



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

VALORIZACION DE UN RESIDUO RICO EN
CROMO Y ALUMINIO

T E S I S

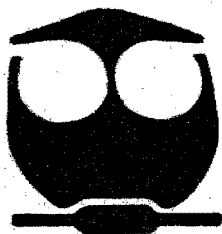
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A N :

SANCHEZ CRISOSTOMO HUGO

ZARAGOZA MORALES ALEJANDRO



MEXICO, D. F.



FEBRERO DEL 2004.

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

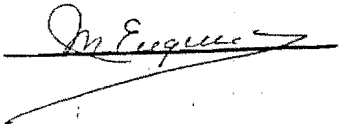
Jurado Asignado

Presidente	Margarita E. Gutiérrez Ruiz
Vocal	Silvia Castillo Blum
Secretario	Juan Mario Morales Cabrera
1er Suplente	Víctor Manuel Luna Pabello
2º Suplente	Juana J. Chávez Espin

Lugar donde se desarrollo el tema:
Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del
Ambiente
Instituto de Geografía
UNAM

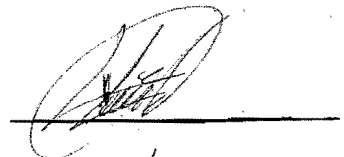
Asesor:

Gutiérrez Ruiz Margarita

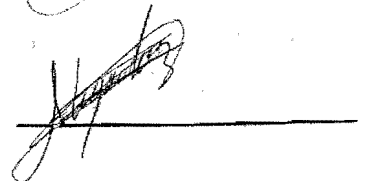


Sustentantes :

Sánchez Crisóstomo Hugo



Zaragoza Morales Alejandro



A MIS PADRES, GIL Y ANTONIA, QUIENES SON EL MEJOR EJEMPLO

A MIS HERMANOS PACO GIL Y GERARDO, POR SU APOYO
INCONDICIONAL,

A MIS HERMANAS PATY, LILI Y LORE, POR SUS REGAÑOS TAN BENÉFICOS

A ROSANGELA, QUIEN ESLENDE MÁS QUE NADIE

A LA UNAM, DONDE HE CRECIDO Y MADURADO EN TODOS LOS ASPECTOS. NO TENGO ESPACIO SUFICIENTE PARA DAR LAS GRACIAS A LOS MUCHOS QUE ME HAN AYUDADO DENTRO DE ESTA CASA, A PROPORCIONAR COMPRENSIÓN Y EJEMPLOS, O QUE A LO LARGO DE MI CARRERA ME HAN CORREGIDO ERRORES, PERO QUIERO QUE TODOS ELLOS RECIBAN MI AGRADECIMIENTO MÁS PROFUNDO.

A LA MAESTRA MARGARITA, POR LA ASESORÍA E INSTRUCCIÓN EN ESTE TRABAJO Y POR AYUDAR A DESARROLLARME TANTO PROFESIONAL COMO PERSONALMENTE; Y ME ENSEÑO QUE EN UNA BUENA CAUSA, NO HAY FRACASOS. ESPERO QUE DONDE ESTÉ SIEMPRE ME ENCUENTRE CON PERSONAS COMO ELLA.

AL M. EN C. GERARDO MARTÍNEZ, QUIEN SIEMPRE SERÁ EL "JEFAZO" POR SUS ASESORÍAS EN EL LABORATORIO Y SU APOYO; PERSONAS COMO EL SON LAS QUE HACEN FALTA EN LA UNAM.

AL PERSONAL DE CIMA, POR SU CONFIANZA AL HACERME PARTICIPE DE SU PROYECTO.

AL PERSONAL DE LAFQA, ESPECIALMENTE A ELENA Y A DANIEL, POR SU APOYO Y PRINCIPALMENTE POR SU AMISTAD.

A LA DRA. SILVIA CASTILLO, AL ING. MARIO CABRERA Y AL ING. RAMÍREZ PERALTA POR SUS CONSEJOS PARA MEJORAR ESTE TRABAJO.

AGRADEZCO DE MANERA ESPECIAL A MIS PADRES, DON GIL Y TONCHIS, POR SU APOYO, COMPRENSIÓN Y CARIÑO. POR ENSEÑARME LAS MEJORES LECCIONES EN LA VIDA Y ESTAR CONMIGO CUANDO MÁS LO HE NECESITADO.

A MIS HERMANOS, POR QUE GRACIAS A ELLOS SOY LA PERSONA QUE QUIERO SER.

A ROSANGELA, QUIEN ME HA AYUDADO CON SUGERENCIAS, CRÍTICAS SOBRE ESTE TRABAJO. DE ELLA HE APRENDIDO MÁS DE LO QUE SOY CAPAZ DE DECIR; ME RECONOZCO AFORTUNADO DE HABER ENCONTRADO UNA PERSONA A LA QUE ADMIRO POR SUS CONSEJOS Y JUICIO, SU SENTIDO DEL HUMOR Y VISIÓN VALEROSA Y QUE ES ADEMÁS EL AMOR DE MI VIDA.

A TODO EL GRUPO CON EL QUE CONVIVÍ LOS SAGRADOS JUEVES, A CADA UNO DE ELLOS POR HABERME AGUANTADO Y DISFRUTADO DE MOMENTOS QUE NO SE PODRÁN REPETIR; POR CADA UNO DE ESOS DÍAS, CUANDO NO TENÍAMOS NADA QUE PERDER.

A HUGO, POR QUE A PESAR DE LAS DISCUSIONES, REALIZAMOS UN BUEN TRABAJO, ADEMÁS DE LOS MOMENTOS COMPARTIDOS.

TAMBIÉN A LA GORDA (MEMO), CON QUIEN PASE MÁS DE LA MITAD DE LA CARRERA Y POR LOS MOMENTOS DE SANO ESPARCIMIENTO, PERO ESPECIALMENTE POR ENSEÑARME EL VALOR DE LA HONRADEZ.

AL INGENIERO RAFAEL SÁNCHEZ, POR SU APOYO Y AYUDA PARA LA REALIZACIÓN EN LA PARTE DE INGENIERÍA, ADEMÁS DE SU AMISTAD HACIA TODA LA FAMILIA POR TANTOS AÑOS.

A DIOS

POR DARMER LA DICHA DE VIVIR Y DE TENER UNA HERMOSA FAMILIA Y AMIGOS.

A MIS QUERIDOS PADRES

DON OSCAR Y DOÑA JOSEFINA, POR ENSEÑARME LA IMPORTANCIA DEL TRABAJO DIARIO, POR EL AMOR, APOYO Y COMPRENSIÓN.

A MIS HERMANOS

POR PERMITIRME SER PARTE DE SU MUNDO, POR SU APOYO EN LOS MOMENTOS DIFÍCILES Y SUS CONSEJOS CUANDO ESTABA A PUNTO DE CLAUDICAR.

A ROSITA

PORQUE SIEMPRE ESTUVO EN LOS MOMENTOS EN QUE MÁS NECESITE UN CONSEJO, BRINDÁNDOME SU APOYO Y COMPRENSIÓN.

A LA MAESTRA MARGARITA

PUES ELLA NOS MOSTRÓ QUE EL CAMINO DEL ÉXITO ESTA CIMENTADO CON LA DEDICACIÓN Y EL TABAJÓ, Y CON PACIENCIA NOS BRINDÓ ASESORJA Y NOS INCULCO EL AMOR Y RESPETO HACIA NUESTRO MEDIO AMBIENTE. NUNCA LA OLVIDARÉ.

A MI AMIGO Y MAESTRO GERARDO MARTÍNEZ "EL JEFE"

PUES CON SUS CONSEJOS Y DIRECCIÓN PUDIMOS LLEGAR AL FÍN DE ESTE PROYECTO.

AL EQUIPO LÁFQA

ELENITA, PILAR, ESTELA, SIILKE, HILDA, RUTILIO, CLAUDIA, NORMA PORQUE CON ELLOS PASE GRANDES MOMENTOS Y COMPARTIERON CONMIGO SU EXPERIENCIA Y CONOCIMIENTOS.

ALEX

POR QUE ADEMÁS DE COMPARTIR TRABAJO, FUE UN GRAN AMIGO CON EL QUE PASÉ MOMENTOS AGRADABLES Y JUNTOS CULMINAMOS ESTE GRAN PROYECTO

A MIS AMIGOS Y AMIGAS

PUES SIMPRE ESTUVIERON EN LOS MOMENTO DE FELICIDAD Y TRISTEZA, ESPECIALMENTE A TI MI AMIGA FRITZ GRACIAS POR ESOS MOMENTOS DE VALOR ICALCULABLE.

A MI ADORADA UNIVERSIDAD, PORQUE EN SUS AULAS APRENDÍ EL SIGNIFICADO DE LA PALABRA "TRABAJO"

A TODOS ELLOS, MIL GRACIAS

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	2
1. ANTECEDENTES	7
1.1 Generalidades del cromo	7
1.1.1. Propiedades y estado natural	7
1.1.2 Aplicaciones industriales	9
1.1.3 Métodos de producción de cromatos y dicromatos .	10
1.1.4 Peligrosidad y riesgo del cromo	12
1.1.4.1 <i>Función biológica</i>	12
1.1.4.2 <i>Transporte, acumulación y toxicología del cromo</i>	13
1.1.4.3 <i>Factores de riesgo</i>	17
1.2 Composición y origen de los residuos con Cr (VI) en estudio	21
1.2.1 Descripción del proceso generador	21
1.2.2 Características de los residuos	23
1.2.3 Propuesta general para el manejo de los residuos	24
1.3 Aspectos legales del control de los residuos peligrosos	25
2. PARTE EXPERIMENTAL	29
2.1 Planeación	29
2.2 Selección y tratamiento de las muestras	29
2.3 Caracterización del residuo	31
2.3.1 Parámetros generales	31
2.3.2 Contenido de Cr (VI)	31
2.4 Experimentos de extracción	32
2.4.1 Condiciones generales para la recuperación de cromo	32
2.4.2. Métodos de cuantificación	32
2.4.3. Descripción de los experimentos	33
Relación residuo:agua	33
Tiempo de extracción de Cr (VI)	33
Determinación del efecto de adición de ácidos y bases	33
2.4.4 Efecto de la fuerza iónica	33
2.4.5 Extracciones secuenciales con agua	35
2.4. 6 Extracciones con solución salina	36
2.4.7. Extracciones secuenciales con solución salina preparada con residuos ricos en carbonatos	36
2.4.8. Extracciones secuenciales con agua y solución de carbonatos de sodio	38

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1 Contenido de Cr (VI) en el residuo	39
3.2 Optimización de las condiciones de extracción de Cr (VI) en el residuo	43
3.2.1 Relación residuo : agua	43
3.2.2 Tiempo de extracción de Cr (VI)	44
3.2.3 Determinación del efecto de adición de ácidos y bases	45
3.2.4 Efecto de adición de sales (intercambio y fuerza iónica)	48
3.3 Condiciones de recuperación de Cr (VI)	53
3.3.1 Extracciones secuenciales con agua	54
3.3.2 Extracciones con solución salina	56
3.3.3 Extracciones secuenciales con solución básica generada con residuos minerales	58
3.3.4 Extracciones secuenciales con agua y solución de carbonato de sodio	60
3.4 Selección de las condiciones de extracción	61
4. DISEÑO	63
4.1 Descripción del proceso	63
4.1.1 Acarreo del residuo	64
4.1.2 Trituración y molienda	64
4.1.3 Lavado del residuo	65
4.1.4 Capacidad estimada	66
4.1.5 Selección del sitio	66
4.1.6 Diagramas de proceso	66
4.2 Filosofía básica de operación	67
4.2.1 Secuencia de operaciones	67
4.3 Diseño del equipo de proceso	70
4.3.1 Molienda	70
4.3.2 Tuberías	70
4.3.2.1 Tubería de descarga de pulpa a los tanques de agitación	72
4.3.2.2 Tubería de desalojo de extracto	74
4.3.2.3 Tubería de desalojo de pulpa al espesador	75
4.3.2.4 Tubería de alimentación de carbonatos	76
4.3.2.5 Tubería de desalojo de extracto del espesador	77
4.3.2.6 Tubería de desalojo de lodos del espesador	78
4.3.4 Bombas	79
4.3.4.1 Bomba para la alimentación de pulpa (BO-01)	81
4.3.4.2 Bomba para la alimentación de carbonatos (BO-02)	82
4.3.4.3 Bomba para desalojo de extracto (BO-03)	84
4.3.5 Diseño de los tanques de proceso	86

4.3.5.1 Espesor de paredes	88
4.3.5.2 Tanques de agitación	90
4.3.5.3 Tanque de pulpa	92
4.3.5.4 Tanque de carbonatos	94

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
---------------------------------------	------------

APENDICES	111
------------------	------------

A.1 Resultados de los análisis cualitativos y cuantitativos del residuo rico en alúmina	111
---	-----

A.2 Métodos y técnicas experimentales	112
---------------------------------------	-----

ANEXOS	116
---------------	------------

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria juega un papel fundamental en el crecimiento de toda nación ya que es generadora de bienes de consumo, tecnología y empleo, por lo que es muy importante para el desarrollo de la economía regional y, especialmente de la local. Sin embargo, los procesos industriales son abiertos en energía y materia, por lo que generan un impacto sobre el ambiente, ya sea por el consumo de energía, agua y otros recursos naturales, o por la generación de desechos, los cuales dependiendo su estado físico afectan a la atmósfera, al agua o al suelo

La magnitud del impacto de los procesos industriales sobre el ambiente depende del nivel de control de los mismos, por lo que en los países llamados en vías de desarrollo, en que los recursos económicos para adquirir las tecnologías avanzadas o llevar a cabo sistemas de reingeniería son muy limitados, la problemática es mayor. Cabe señalar que todos los países industrializados que actualmente tienen controles de proceso muy estrictos, sufrieron en el pasado un grave deterioro de su ambiente, inclusive se presentaron enfermedades mortales antes desconocidas, relacionadas con la dispersión de contaminantes industriales, entre ellos metales transicionales como el Hg, Cd y Cr.

En los países en vías de desarrollo, la industria ha tenido un crecimiento no planeado, en muchas ocasiones los equipos son obsoletos y se usan combustibles "sucios" y el control de proceso no es el deseable. Además, el marco jurídico ambiental es incipiente, por lo que los instrumentos y herramientas de política son insuficientes y a veces inexistentes.

En México, la tendencia para controlar el impacto de la industria y los servicios se ha enfocado a emitir normas, y no se han desarrollado otras herramientas. La aplicación de la normatividad se ha visto limitada por diferentes factores, entre ellos el que los sistemas de vigilancia son ineficientes y no se cuentan con instrumentos de política como son los incentivos fiscales para que la industria implemente programas de gestión ambiental. Además hay otras limitantes, como el hecho de que las leyes, reglamentos y normas contienen errores u omisiones de carácter científico, técnicos y jurídico, que permite a la industria no cumplir con sus obligaciones mediante una defensa puramente legal. Como consecuencia, bajo estas condiciones, la industrialización en México unida al aumento de la población y los patrones de consumo, han causado la degradación de los suelos, el agotamiento y contaminación de los cuerpos de agua, y la contaminación de la atmósfera.

Entre los errores científicos de las normas, cabe mencionar que la NOM-ECOL-052/1993 considera peligroso por su toxicidad a todo residuo que, utilizando como extractante una solución amortiguadora de ácido acético, libera a uno o mas de los elementos listados en la misma. Sin embargo, la solución extractante solamente

simula lo que sucede cuando un residuo industrial se pone en contacto con basura biodegradable, y no lo que ocurre cuando el residuo queda sujeto al intemperismo natural. Además, incluye en la lista a los elementos en forma total y no por especies químicas, lo que lleva a considerar igualmente peligroso a un residuo que contiene Cr(III) que a uno que contiene Cr(VI), cuando los efectos sobre la biota y, en especial, en el hombre son completamente diferentes. Además, esta norma no considera a otros factores de peligrosidad como son la cantidad y a la disponibilidad física. Esto es, para que una sustancia represente un riesgo para la biota, requiere encontrarse en cantidades que superen la capacidad amortiguadora del medio y que pueda transportarse por aire, agua y suelo; lo que implica que el contaminante esté formando compuestos gaseosos, líquidos o sólidos de pequeño tamaño (coloides). Cabe mencionar que no toda sustancia clasificada como peligrosa que este disponible en altas cantidades en el ambiente representa un riesgo para la biota, pues además se requiere que haya una población expuesta y una vía de entrada (ingestión, absorción, inhalación) y, por último, que la dosis supere a los mecanismos de defensa del individuo afectado.

Sin embargo, la población percibe a la industria como un factor de riesgo ya que no puede discriminar cuando hay o no exposición. Especialmente, las comunidades se preocupan cuando percibe en las emisiones de la industria la presencia de contaminantes, ya sea por que presentan olor o color o dañan las construcciones, etc. Uno de los ejemplos más claros lo constituyen los residuos generados por los procesos industriales que producen cromatos, ya que siempre presentan alguno de los colores típicos de este elemento, generalmente amarillo,

y forman lixiviados también coloridos por efecto de la lluvia que son tóxicos y corrosivos.

En México existen dos depósitos con Cr(VI), uno localizado al norte de la Cd. de México, en el municipio de Tultitán, que es un cementerio cubierto con pavimento y construido directamente sobre el suelo, y otro en el estado de Guanajuato, en el municipio de San Francisco del Rincón, en que el material está dispuesto sobre geomembranas y cuenta con recolecta de lixiviados que son enviados a tratamiento. En el primer caso, no existe un responsable directo ya que la empresa cerró cuando no existía ninguna legislación ambiental al respecto, mientras que en Guanajuato la empresa generadora ha apoyado diversos estudios para resolver la problemática.

Contando con la ayuda de la empresa generadora y de la Agencia de Cooperación Técnica de Alemania, el proyecto Residuos Peligrosos del Instituto de Geografía desarrolló un método de estabilización para estos residuos a nivel de laboratorio, el cual posteriormente fue escalado hasta ingeniería de detalle por la empresa Perry Ingenieros y Proyectos. La tecnología fue aprobada por las autoridades ambientales y se sometió a la evaluación de Nacional Financiera S.A. (banca de segundo piso) para adquirir un crédito que permitiera llevar a cabo la construcción de la planta estabilizadora. Sin embargo, los bancos de primer piso no otorgaron el crédito por considerar que el proceso no era productivo, ya que no tomaron en cuenta los beneficios económicos que representaba para la empresa el resolver el

problema de los residuos, especialmente el poder seguir operando y asegurar su competitividad en el mercado nacional e internacional.

Con el objeto de lograr los fondos necesarios para construir la planta, se consideró necesario modificar el proyecto para no solamente estabilizar los residuos y reducir el riesgo para el ambiente y población, sino obtener productos de los mismos. Este estudio tiene como objetivo la recuperación de Cr (VI) de los residuos para su reuso en la fabricación de sulfato básico de cromo. Especialmente, se estudiaron los tipos de residuos denominados "alumina" por su alto contenido de aluminio.

Las metas específicas son las siguientes:

Determinar las condiciones óptimas de recuperación de cromo hexavalente, minimizando el consumo de agua, energía y tiempo

Desarrollar la ingeniería básica para recuperar el cromo hexavalente.

1. ANTECEDENTES

1.1 Generalidades del cromo

1.1.1. *Propiedades y estado natural*

El elemento fue descubierto en 1798 por Vauquelin, y como todos sus compuestos presentan color, le dio el nombre de cromo que deriva del vocablo griego "croma", que significa color. Es un metal de transición cuya masa atómica es 52.94, pertenece al grupo VI (6 en la nueva notación) de la tabla periódica y su configuración electrónica es $[Ar] 3d^5 4s^1$; por lo que presenta estados de oxidación de 0 a 6, sin embargo, los más estables termodinámicamente son el 3 y 6 (Keenan et al. 1986).

Es un metal duro, blanco y brillante, que presenta una densidad elevada de 7,19 g/cm³ a 20° C. El cromo es fácilmente maleable, se vuelve quebradizo por la presencia de impurezas, es estable al aire y no reacciona con el agua. Los oxidantes fuertes originan una capa de óxido refractario que lo protege del ataque de ácidos diluidos. El cromo se disuelve en ácidos no oxidantes con desprendimiento de hidrógeno, como el ácido fluorhídrico, y también en agua regia, pero es insoluble en bases. A temperaturas elevadas reacciona con casi todos los no metales.

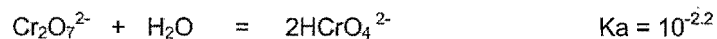
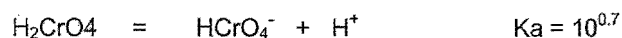
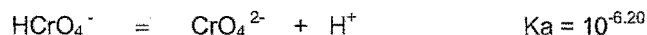
La producción industrial del cromo comenzó en 1898 y se obtiene, por reducción del trióxido con aluminio, por el proceso de aluminotermia de Goldschmidt" (Babor e Ibarz 1964 p. 687), que si se realiza a vacío produce cromo del 99-99,3% de pureza. También se obtiene cromo metálico del 99,95% de pureza por la electrólisis de sales de Cr (III). (Kirk y Othmer, 1979).

El cromo se encuentra en la corteza terrestre en un 0,0102% en peso. El mineral más abundante es la cromita ($FeCr_2O_4 = FeO \cdot Cr_2O_3$), que contiene Cr (III) cuya composición puede variar por sustituciones isomólicas del Cr (III) y Fe (II). El Cr(VI) solamente se encuentra en la naturaleza como mineral crocoíta ($PbCrO_4$) y fenicrocoíta [$Pb_3O(CrO_4)_2$] (Poschenrieder, Ch. et al.1986).

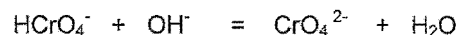
El Cr (III) presenta un comportamiento geoquímico diferente al Cr (VI), ya que los compuestos del primero generalmente son insolubles y cinéticamente muy estables, mientras que el Cr (VI) forma compuestos muy solubles en todo el intervalo de pH y tiende a reducirse a Cr (III), en medio ácido y en presencia de agentes reductores.

El Cr(III) a pesar de ser la especie más estable termodinámicamente, dependiendo del pH, pE y temperatura puede transformarse a Cr (VI), aunque bajo condiciones ambientales la oxidación no es favorable (Guha, et al. 2001)

El cromato de sodio anhidro existe en medio básico en forma de cristales ortorrómbicos amarillos y funde a 780°C. Además de esta sal anhidra, el cromato de sodio forma hidratos con 4,6 y 10 moléculas de agua. En soluciones básicas y a pH superior a 6, el CrO_3 forma el ión tetraédrico de color amarillo CrO_4 . A un pH comprendido entre 2 y 6, aproximadamente, existe un equilibrio entre el HCrO_4^- y el ión dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ de color rojo a naranja. Los equilibrios son los siguientes:



Además existen los equilibrios correspondientes a la hidrólisis básica:



Los equilibrios que dependen del pH son bastante lábiles y por adición de cationes que forman cromatos insolubles, por ejemplo, Ba^{2+} , Pb^{2+} ó Ag^+ , precipitan los cromatos en vez de los dicromatos.

1.1.2 Aplicaciones industriales

Como todos los compuestos de cromo son coloreados; los más importantes son los cromatos de sodio y potasio (amarillos) y los dicromatos (naranjas) y alumbres de cromo potasio y amonio (violetas); se utilizan como materia prima para la fabricación de colorantes. La cromita se utiliza para fabricar materiales refractarios, como ladrillos y moldes, ya que tiene alto punto de fusión, moderada dilatación y es químicamente estable.

Sus sales también se usan para la fabricación de vidrio ya que le imparte un color verde esmeralda y para fabricar esmaltes cerámicos; como inhibidores de la corrosión y fungicidas oxidantes. En el curtido de la piel se utiliza $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$ que se produce reduciendo el cromato de sodio con SO_2 o cualquier otro agente rico en electrones. El Cr (III) se une al colágeno de la piel e impide su degradación biológica, pero la mantiene flexible. (Ullmann). Las sales de Cr (VI) por su poder oxidante también se utilizan para cuantificar sustancias reductoras como el Fe (II).

La industria textil utiliza algunas sales de cromo como mordientes, compuestos denominados alumbres que forman hidróxidos o oxi-hidróxidos sobre el textil y adsorben de la solución al colorante, impartiendo un color estable y duradero.

A continuación se listan algunos de ellos:

Sulfato doble de potasio y cromo ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$)

Fluoruro de cromo, CrF_3 , que es una sal soluble y de color verde

Sulfato de cromo, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ sal de color azul que se obtiene tratando el alumbre de cromo con ácido sulfúrico diluido, o por reducción de una solución sulfúrica de ácido crómico, el cual también se emplea en tintura

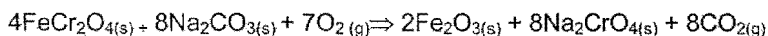
Sulfito de cromo, $\text{Cr}_2(\text{SO}_3)_3$ que se obtiene por disolución del hidróxido de cromo, o del alumbre de cromo, o del sulfato de cromo, en una solución de ácido sulfuroso. También se obtiene este compuesto cuando se tratan las sales de cromo antes mencionadas con sulfito sódico, o bisulfito de sodio o calcio.

El CrO_3 es un compuesto fuertemente corrosivo y tóxico que se emplea en el proceso de cromado; mientras que el Cr_2O_3 es un sólido de baja solubilidad de color verde que se obtiene por calcinación del dicromato amónico. Este óxido de Cr (III) se emplea como catalizador, en la industria de las pinturas; así como para impartir color a vidrios y porcelana, aunque su principal uso es para la obtención de cromo metálico. El CrO_2 es material ferromagnético utilizado para recubrimiento de las cintas de cassette de "cromo", ya que responde mejor a los campos magnéticos de alta frecuencia que las cintas convencionales de "hierro" (Fe_2O_3).

1.1.3 Métodos de producción de cromatos y dicromatos (Kirk- Othmer, 1979).

El cromato y dicromato de sodio son productos industriales que se utilizan en múltiples procesos y se obtienen de la cromita. A partir de estos compuestos se producen el cromato y dicromato de potasio, el dicromato de amonio, el ácido crómico y varias formulaciones de sulfato crómico básicas usadas principalmente en el curtido de pieles.

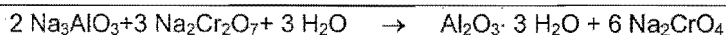
Para la producción de cromatos la cromita, -que contiene de un 42 a un 50 % de óxido crómico (Cr_2O_3)-, se muele hasta obtener polvos aproximadamente de $74 \mu\text{m}$ (200 mesh), se mezcla con carbonatos de sodio (Na_2CO_3) y se agrega cal (CaO). Se introduce en un horno giratorio y se calienta a una temperatura de 2000°F (1100°C) en atmósfera oxidante. El tiempo de tostado depende de las características de la mena de cromo, de las proporciones de la mezcla, de la carga del horno y de la temperatura, siendo en promedio de aproximadamente 4 horas. La reacción es la siguiente:



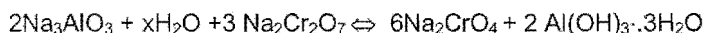
Al salir del horno, la carga se deja caer por gravedad a un enfriador giratorio y, posteriormente, se pasa a una batería de cajas lixiviadoras de falso fondo, con capacidad para 56 750 kg de material tostado. La lixiviación se efectúa con agua a

contracorriente y se obtiene una solución casi saturada de Na_2CrO_4 . ($\cong 500$ g/L). Una parte del residuo lixiviado se introduce en secadores giratorios y el resto se desecha. El residuo seco se muele hasta que pase por un tamiz de malla 100 y se adiciona a la mezcla de mineral de cromo y carbonato de sodio. El residuo no utilizado se almacena.

Cuando no se adiciona cal a la mezcla inicial, la solución lixiviada de cromato de sodio contiene aluminato de sodio (Na_3AlO_3) y vanadatos. Para separar estos compuestos se pasa la solución por un filtro para eliminar las partículas de materia suspendida y, posteriormente, se bombea a una batería de tanques hidrolizadores de operación intermitente, en donde se agrega lentamente una solución ácida de dicromato de sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Esta sustancia cuando se mezcla con la solución básica se convierte en Na_2CrO_4 y se precipita alúmina hidratada impura ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), con un grado mayor de cristalización que cuando se utiliza ácido sulfúrico. A continuación se presentan las reacciones que ocurren:



Las velocidades de reacción son muy diferentes para cada una de las anteriores reacciones. La primera reacción que es la hidrólisis del aluminato de sodio en solución fuerte de cromato se efectúa muy lentamente y forma un producto cristalino; en cambio, la segunda reacción del hidróxido de sodio (NaOH) con el dicromato de sodio es casi instantánea, por lo que si se añade demasiado rápido el dicromato sódico, se forma un precipitado gelatinoso de alúmina amorfa, como se muestra en la siguiente reacción:



1.1.4 Peligrosidad y riesgo del cromo

1.1.4.1 Función biológica

Este elemento en su estado trivalente se le considera como benéfico para todos los seres vivos, ya que ayuda al crecimiento y a la reproducción, y además es un elemento esencial para los mamíferos incluyendo a los humanos, pues funciona como factor de tolerancia de la glucosa (Mertz, 1979 tomado de EPA 1979 p. C-47);

Es un cofactor en la iniciación de la acción periférica de la insulina y también desempeña un papel importante en diferentes reacciones enzimáticas, como es el caso de la actividad tromboplástica y betagluconidasa (Langård, Norseth, 1979; Mertz, 1969; Huheey, J.E. 1978 p. 774). En las fracciones purificadas de RNA también se han encontrado cantidades considerables de cromo coordinado, aunque hasta la fecha no se ha podido determinar cual es su función (Dupuis y Benezra, 1982).

Sus requerimientos diarios son del orden de 50 a 200 µg, con un valor medio diario de alrededor de 75 µg (Anderson, 1980).

Las fuentes de cromo más ricas son las proteínas animales, especialmente se encuentra en el hígado y carnes. Con relación al consumo vegetal hay que señalar que se encuentra en los almidones, pero en menor abundancia que en los alimentos animales, ya que la mayoría de las plantas absorben relativamente poco cromo del suelo. Algunas especies tienen una mayor concentración en las raíces (zanahorias y nabos) y algunas en las partes verdes (tomates, cebollas y coles) (Kumupulainen, 1992).

En los mamíferos, incluyendo a los humanos, la deficiencia de cromo puede dar lugar a una intolerancia a la glucosa o producir neuropatía, así como la disminución del crecimiento, opacidad córnea y degeneración necrótica del hígado (Zielhuis, 1981).

Los compuestos de coordinación del Cr (III) con moléculas orgánicas se absorben mejor que las formas inorgánicas, por lo que los complementos vitamínicos contienen picolinato de cromo; que es el segundo suplemento nutricional más popular después de los suplementos de calcio (Dione et al., 2001).

1.1.4.2 Transporte, acumulación y toxicología del cromo

Al Cr (III) se le considera relativamente inocuo (Wong, 1989 y Katz y Salem 1993). La baja toxicidad del Cr (III) se debe en general a que sus compuestos son prácticamente insolubles en el intervalo de pH natural¹, lo que controla la concentración de esta especie en solución, incluyendo el suelo y cuerpos de agua. Además el Cr (III) forma con 6 moléculas de agua un complejo soluble, pero que desde el punto de vista cinético es prácticamente inerte (Cotton y Wilkinson, 1973 p. 855).

En cambio el Cr(VI) forma sales oxidantes muy solubles con todos los elementos, a todo lo largo del intervalo de pH, con excepción del cromato de plomo, plata y bario y es altamente tóxico para la mayoría de los organismos (Cervantes et al. 2001). Cabe mencionar que algunas sales del Cr(III) de uso industrial como el sulfato básico de cromo (corrosivo) pueden ser más tóxicas (Barceloux, 1999). Sin embargo, la diferencia de toxicidad entre ambas especies es muy importante, como lo muestran las dosis de referencia (RfD). Para Cr (III) la US EPA estableció 1 mg/kg/día, mientras que para Cr (VI), 0.005 mg/kg/día (Barceloux, ibidem).

La toxicidad del Cr (VI) se debe principalmente a su capacidad oxidante antes mencionada, ya que cuando está en contacto con los compuestos orgánicos esenciales de un organismo (reductores) se consumen electrones, pudiendo

¹ Como ya se comentó, el cromo, generalmente se encuentra en el ambiente como Cr (III) formando minerales termodinámicamente estables e insolubles, que bajo condiciones normales no representan ningún riesgo para la biota

inhibir un número de procesos metabólicos importantes. Por ejemplo, la síntesis intracelular de ATP, el intercambio de fosfolípidos de las membranas y la reducción de los iones peróxido (De Flora, et al.1989; Yawata y Tanaka, 1973; Hagenfeldt y Arvidsson, 1978).

Los efectos tóxicos agudos del Cr(VI) pueden dar lugar a un ataque cardiovascular inmediato y a efectos posteriores sobre riñón, hígado, sistema nervioso y órganos hepáticos (Barceloux, 1999).

Las diferencias en toxicidad y comportamiento entre el Cr(III) y el Cr(VI) se deben principalmente a la alta solubilidad de la especie hexavalente con respecto a la insolubilidad de la trivalente, lo que causa una diferencia significativa en disponibilidad, ya sea en el medio abiótico (disponibilidad física) o dentro de los organismos (biodisponibilidad). Estas diferencias también generan variaciones en el grado de absorción por las diferentes vías de entrada del cromo a los organismos que son: contacto dérmico, ingestión e inhalación, siendo esta última la principal vía en la exposición laboral.

La absorción de los compuestos de Cr (III) es del orden del 0.1 al 1.2%, mientras que los Cr (VI) aproximadamente el 2%. Se considera que la absorción media en el tracto digestivo es del orden del 0.5% al 3%, dependiendo no sólo del estado de oxidación sino del estado funcional del estómago e intestino. (Smith y Blough 1983; pág. 491-494).

Uno de los cuadros patológicos más importantes que produce el Cr, es la dermatitis alérgica de contacto, donde los compuestos de Cr (VI) penetran en la piel más rápidamente que los de Cr(III), aumentando la velocidad con el incremento de pH (González, 1991). Este fenómeno se evita cuando el tejido afectado tiene carácter ácido, ya que el Cr(VI) se reduce "in situ" a Cr (III) y se une fuertemente a determinadas proteínas de las capas superficiales de la piel, formando compuestos de coordinación muy estables que eliminan el riesgo de dermatitis y ulceraciones.

Los otros factores que también influyen en el grado de absorción a través del estrato córneo de la epidermis, son: a) abrasión, heridas o quemaduras; b) aumento de la hidratación del estrato córneo, c) contacto con disolventes orgánicos que eliminan el manto ácido graso de la piel y d) bajo espesor y alta difusividad de la capa córnea (Rinehart y Gad 1986; pag. 696-699).

La interacción biológica de Cr (VI) en las partes internas de los organismos seguida de la reducción "*in situ*" a Cr (III) y la formación de compuestos de coordinación con biomoléculas, es muy importante para la actividad del llamado factor de tolerancia a la glucosa (FTG).

Las diferencias entre Cr (III) y Cr (VI) también inciden en los mecanismos de transporte y acumulación en los organismos vivos. El Cr (VI) es activamente transportado a través de las membranas biológicas, y ya dentro de las células se reduce a Cr (III), probablemente vía la formación de especies intermedias de Cr (V) y Cr (IV). En cambio la mayoría de las células no permiten el paso del Cr (III) (Cervantes et al. 2001).

Los complejos de Cr (V) se forman a partir del Cr (VI) por agentes reductores fisiológicos como el NAD(P)H, FADH₂, pentosas y glutatona (Shi y Dalal, 1990^a y 1990^b). Estos compuestos reaccionan con H₂O₂ para generar cantidades importantes de radicales OH que pueden directamente alterar el ADN y producir otros efectos tóxicos.

Otros reductores del Cr (VI) son la vitamina C y b₁₂, el citocromo P-450 y la cadena mitocondrial respiratoria. El Cr (III) formado puede ser secuestrado por los grupos fosfatos del ADN afectando los mecanismos de replicación y transcripción, y causando mutagénesis (Cervantes et al. 2001). También el Cr (III) puede reaccionar con grupos carbonilos y sulfhídricos de las enzimas causando alteraciones en su estructura y actividades (Levis y Bianchi, 1982). Es posible que la sustitución del Ca por Cr (III) sea la causa de las modificaciones de la polimerasa del ADN y otras enzimas (Cervantes et al. op. cit.).

Una vez unido a los tejidos, el Cr(III) se encuentra principalmente en sangre, hígado, bazo, riñón, tejidos blandos y hueso; y por el contrario no se acumula en el pulmón. La excreción se produce principalmente por la vía del *aclaramiento* renal y en menor grado por otras vías más lentas como *descarnación* de la piel (células, uñas, pelo, sudor), bilis y heces. Según Capellmann y Bolt (1992), el método sencillo de desintoxicación es mediante la reducción por ácido ascórbico.

En el ambiente el Cr.(III) forma con el agua compuestos hexacoordinados que aunque son solubles son inertes y tienden a precipitar bajo las condiciones normales de pH/pe del suelo y cuerpos de agua. Inclusive cuando el Cr (III) forma complejos orgánicos solubles, -que de acuerdo a Srivastava et al, (1999) son más disponibles para las plantas que los compuestos inorgánicos- hay otras barreras que posiblemente impiden que el Cr (III) sea absorbido, como es el alto potencial de la reducción del Cr (III) a Cr (II), que de acuerdo a Cary et al. (1977) es la especie que puede entrar y translocarse a las partes áreas de las plantas.

Una vez que el cromo traspasa la barrera radicular, también hay diferencias entre el Cr(III) y el Cr(VI), ya que este último se absorbe, transporta y acumula en mucho mayor cantidad que el primero (Zayed et al., 1998). Esto posiblemente se debe a que el Cr (VI), como es soluble, es transportado por el xylem, mientras el Cr (III) es retenido en las paredes (vessel walls) por interacciones similares a las del Ca^{2+} (Skeffington, et al. 1976). Sin embargo, el grado de translocación dentro de la planta es muy limitado ya que la mayor parte se acumula en las raíces (10 a 100 veces que en otros tejidos), posiblemente por fenómenos de precipitación.

En conclusión, la baja solubilidad, la estabilidad cinética de los compuestos de coordinación del Cr(III) con moléculas de agua y oxhidrilos, e inclusive la reducción del Cr(VI) por la materia orgánica y la consecuente inmovilización como complejos de Cr(III), explican que hasta hoy no se haya reportado ningún caso de toxicidad por Cr (III) asociados a suelos y cuerpos de agua contaminados. Incluso la EPA (1979, p. C-4) puntualiza que la dieta estadounidenses es potencialmente

deficiente en cromo, por lo que un incremento artificial en la absorción de este elemento puede ser benéfico.

El riesgo ambiental quizá más importante es el relacionado a la contaminación con Cr(VI) de cuerpos de agua o suelos básicos pues bajo esas condiciones no se reduce y se mantiene soluble y oxidante. Los casos de intoxicación, generalmente, están asociados al riesgo laboral por contacto con Cr (VI).

1.1.4.3 Factores de riesgo

Ocupacional

Aún cuando se han establecido límites ocupacionales de exposición para la presencia de cromo en el ambiente, sus variadas formas de presentación química pueden hacer variar el riesgo efectivo para la salud que representa la exposición.

Para cromo y sus sales solubles:

TWA: 0.5 mg/ m³ (OSHA)

TWA: 0.025 mg/ m³ (NIOSH)

STEL: 0.05 mg/ m³ (ACGIH)

El establecimiento de un valor límite para el aire de los ambientes de trabajo no implica que con concentraciones por debajo de este valor no se produzcan efectos adversos en los expuestos, sino que dicho valor, debe considerarse como guía o referencia para proteger a los trabajadores.

Las manifestaciones subagudas y crónicas de la exposición a los derivados de cromo incluyen la afectación de distintos órganos y sistemas, tales como:

Piel y mucosas: El peligro del contacto cutáneo con compuestos de cromo hexavalente se derivan fundamentalmente en los trabajadores de la construcción, produciendo úlceras cutáneas y del septo nasal y, en especial, por su alta frecuencia, dermatitis de contacto alérgica (Tronnier y Turck, 1968).

Sistema respiratorio: Este tipo de riesgo deriva en la mayoría de los casos de la inhalación del polvo y humos procedentes de la fabricación del dicromato a partir del mineral de cromita. También puede deberse a la inhalación de nieblas de ácido crómico durante el proceso de cromado y revestimiento de superficies metálicas.

La inhalación de estos polvos puede provocar daños en el aparato respiratorio, como irritación faríngea, tos, sensación de dolor, bronquitis crónica, rinitis crónica, perforación del septo nasal, y ocasionalmente sinusitis y papilomas (Srivastava et al, 1992). En algunos casos se puede presentar sensibilización al cromo, al igual que con el níquel y cobalto, que traen como consecuencias crisis de asma agudo y dermatosis alérgica al contacto con el compuesto. No todas las personas sensibilizadas presentan los síntomas aunque pueden llegar a exhibirlas al aumentar el contacto. Este tipo de exposición, además de las lesiones cutáneas, también puede producir lesiones en los ojos, tales como conjuntivitis, queratitis y ulceraciones (Moller, 1986). Se han identificado como cancerígenos pulmonares al cromato de calcio, estroncio y plomo, así como al ácido crómico y los dicromatos alcalinos. Generalmente el cáncer de pulmón aparece tras 15 a 20 años de exposición a cromatos. Sin embargo, no parece existir riesgo en la población general por exposición ambiental al cromo (Langård 1980). Este tipo de lesión maligna es el único efecto a largo plazo confirmado de la exposición profesional al cromo entre los trabajadores que participan en los procesos de obtención de dicromatos a partir del mineral de cromita.

Riñón. Recientemente se han publicado varios casos de toxicidad inducida por cromo en trabajadores expuestos a lluvias de ácido crómico y cromo soluble hexavalente de los humos de soldaduras. También se ha descrito un caso de afección renal por cromo (Soto, 1966).

Aparato digestivo: Se ha demostrado que el cromato de zinc posee capacidad de desarrollar cáncer gástrico.

La exposición laboral se considera peligrosa cuando las concentraciones de cromo en la atmósfera oscilan entre 0.1 y 5 mg/m³ (Gil up set), niveles que

pueden existir en plantas en la fabricación de productos de dicromato, en la industria química, en metalurgia, en el trabajo con productos refractarios, en la industria del cromado y en las operaciones de soldadura. Las concentraciones de cromo en el aire urbano suelen encontrarse habitualmente en cifras inferiores a 50 ng/m^3 , salvo en las proximidades de los puntos de emisión que pueden llegar a $80 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. En áreas alejadas encontramos cantidades desde 0.3 hasta 2 ng/m^3 y en el medio rural estas cifras suelen ser generalmente menores a 10 ng/m^3 .

Entre las medidas más usuales de prevención están las normales de ventilación y extracción de polvos, humos y nieblas en el lugar de trabajo, y los exámenes médicos periódicos. Actualmente y según las distintas publicaciones se acepta que para una población sana no expuesta a los compuestos de cromo, la concentración de este elemento en suero y plasma debe presentar un valor máximo de $0.15 \text{ } \mu\text{g/L}$ de cromo, y de $0.4 \text{ } \mu\text{g/L}$ en orina. Como indicador de exposición se utiliza únicamente el cromo detectado en orina, estableciéndose en la población expuesta en una cifra no superior a $150 \text{ } \mu\text{g/L}$.

Por último, se puede destacar que el riesgo más frecuente para la salud pública es el contacto a través de la piel y la sensibilización cutánea que se produce a los compuestos de Cr (VI) que se reducen ya en la piel a Cr (III), afectando entre el 8 y el 15% de la población (Versiek, et al, 1978).

Factores de riesgo ambientales

El establecimiento de los límites ambientales generales esta de acuerdo con las concentraciones que se han verificado en varias partes del mundo y con las cuales no se han detectado efectos en la salud de la población expuesta. A diferencia de los límites ocupacionales que han sido objeto de frecuentes estudios de diferente naturaleza y de constantes evaluaciones, los límites ambientales generales todavía necesitan de mayores evaluaciones, por lo que un futuro pueden sufrir modificaciones.

Los valores límites establecidos para cromo en el ambiente general son los siguientes:

Aire urbano: 50 ng/m³

Agua de río: 10 µg/m³

Agua de océanos: 5 µg/m³

Agua potable: 0.05 mg/L (OMS)

Suelo: mg/Kg en promedio, aunque puede aumentar hasta 250 mg/Kg (no existe un límite preciso).

Hoy en día existe cromo en sus diversas formas en todas las ramas industriales en mayor o menor cantidad así como en muchos productos de uso doméstico. De igual forma se pueden hallar en el ambiente y en la alimentación pequeñas cantidades.

Fuentes naturales

El cromo se encuentran en distinta proporción en la naturaleza. En los suelos no contaminados las concentraciones de Cr (III) varían desde niveles vestigiales hasta 3000-4000 mg/kg en suelos serpentínicos, con valores promedios de 100 a 300 mg/kg (Aubert y Pinta, 1977). En las aguas se encuentra por lo general Cr (III) en concentraciones que oscilan de 1 a 10 µg/L en aguas superficiales y menos de 2 a 3 µg/L en aguas potables (Gil et al, 1995).

Fuentes industriales

Metalurgia, con el 57% de consumo.

Industria química, con un consumo del 27% a partir del mineral de cromo.

Industria de refractarios, con el 16% del consumo para el revestimiento de hornos de alta temperatura.

Fuentes domésticas

Junto a la exposición de origen industrial, existe una exposición individual en las casas habitación y los servicios, especialmente al dicromato potásico que determina en la mayoría de los casos la aparición de dermatitis de contacto adquirida a través del uso de múltiples objetos de uso doméstico, como es el caso de guantes o zapatos de piel. Otros productos también han originado este cuadro dermatológico como ocurre con el fósforo, sustancias antioxidantes, barnices, pinturas amarillas y gomas con cromato, cremas de afeitado y lociones, artículos de cuero tintado al cromo, pintura amarilla o naranja, gomas de pegar, etc (García, et al, 1963).

Especial interés lo tiene sin duda el contenido de cromo en los productos de limpieza de uso doméstico, que llegan a ser de hasta un 0.3mg/L, fundamentalmente en las lejías y detergentes líquidos, cifra muy alta en comparación con el contenido de este metal en los cementos. El origen de metales como son cromo y níquel en los productos de limpieza es incierto, y podría tratarse de una liberación a partir de la maquinaria empleada para su fabricación (García, et al, 1963).

1.2 Composición y origen de los residuos con Cr (VI) en estudio

1.2.1 Descripción del proceso generador

Los insumos utilizados por la empresa en estudio para la producción de cromatos, fueron: cromita, cal y carbonato de sodio. La proporción típica de la mezcla fue 25% cromita, 15% carbonatos, 12% cal y 48% del residuo recirculado del primer paso.

Las etapas del proceso fueron:

Acondicionamiento de la materia prima. En este paso se realizaron operaciones de cribado, secado y molienda de la cromita a 74 micras en un molino de bolas.

Mezcla. Dosificación de la cromita e incorporación del carbonato de sodio, cal y residuo.

Calcinación. Se realizaba en un horno rotatorio en presencia de aire y a una temperatura entre 1100-1200°C. El tiempo de residencia promedio era de 4 horas. Los combustibles usados en los hornos contenían azufre. La cal se adicionaba para aumentar la velocidad de calcinado y para convertir la alúmina y la sílice del material a aluminatos y silicatos solubles.

La reacción global del proceso de formación del cromato es:



Enfriado: Se enviaba la carga a un enfriador giratorio para reducir la temperatura a aproximadamente 600°C.

Separación del cromato: Se colocaba el sólido obtenido en cajas lixiviadoras de fondo falso y se bombeaba agua para solubilizar el cromato, obteniéndose una solución de cromato de sodio que contenía aproximadamente 500g/L de cromato, óxido y aluminato de sodio a un pH cercano a 13.

Lavado: Adición de H₂SO₄ para bajar el pH y formar un precipitado de alúmina, que posteriormente se filtra con sílice.

Proceso húmedo: Acidificación que se realizaba para producir bicromato y sulfato de sodio.

Cristalizado: Enfriado del licor de cromo. El bicromato se cristalizaba y se separaba por centrifugación produciendo aguas madres, se agregaba H₂SO₄ para producir ácido crómico en hojuela. Finalmente se adicionaba melaza para producir sulfato básico de Cr (III) en licor de cromo.

Almacenamiento: Se embalaba los productos de Cr(VI) y Cr(III) en bolsas de polietileno selladas para su posterior venta, y se almacenaban en naves separadas.

1.2.2 Características de los residuos

La empresa generaba a proximadamente 4 200 toneladas/mes (UNAM; 1992) del residuo en el proceso de extracción cuya composición es la siguiente:

CUADRO 1.1 Composición del primer residuo proveniente de los hornos de calcinación	
Compuesto	%
Cr_2O_3	13.26
Fe_2O_3	23.75
Al_2O_3	13.23
SiO_2	1.53
MgO	10.56
CaO	33.05
Na_2O	1.52
V	0.12
Na_2CrO_7	2.65
Humedad	55.3

En el proceso de lavado se generaron residuos de alúmina con una tasa de 3 000 toneladas/año, con la siguiente composición:

CUADRO 1.2 Composición del segundo residuo proveniente del proceso de lavado	
Compuesto	%
$\text{Al}(\text{OH})_3$	21.4
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5.2
Na_2SO_4	4.25
SiO_2	6.2
Humedad	55.3

Los residuos de alúmina se almacenaron en sacos de plástico de calibre de 800 a 50 kg conteniendo cerca de 17,000 toneladas y fueron depositadas en un

contenedor recubierto con una membrana plástica de polietileno calibre 1,000 resistente a la radiación UV, con drenaje para coleccionar los lixiviados que se envían a una planta de tratamiento.

1.2.3 Propuesta general para el manejo de los residuos

Estabilización y fabricación de ladrillos. (Premio Nacional SERFIN del Medio Ambiente, 1990).

En la 1990 se propuso un método general de tratamiento, desarrollado para las aproximadamente 75000 toneladas de residuos de la empresa Cromatos de México, S.A que en 1982, cuando la empresa ya había sido cerrada, fueron ubicados en un cementerio sin protección que ha permitido la lixiviación del cromo hacia el acuífero.

Los análisis efectuados en los residuos confinados clasifican con base a su composición tres tipos de residuos: tipo I rico en sulfato de sodio, cromato de potasio y procede de las tinas de lavado; tipo II alto contenido en cromita rico en aluminio y hierro originado en los hornos y tipo III que contiene arcillas, sílice y carbonatos.

El proceso de estabilización del residuo consiste en una reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente una especie estable termodinámicamente y poco soluble, mediante el uso de ácido residual generado por una industria metal-mecánica ubicada en la vecindad del cementerio de cromatos que básicamente contiene ácido sulfúrico y sulfatos de hierro II.

El proceso de estabilización consiste en las siguientes etapas: molido del residuo, disolución parcial, adición del ácido residual hasta un pH de 2, adición de cal hasta lograr un pH de 8.5, filtración, secado al aire del sólido formado; evaporación del filtrado y cristalización del sulfato de sodio.

La estabilización reduce el cromo hexavalente a cromo trivalente, la adición de cal aumenta el pH y precipita al cromo en forma de sulfato crómico $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ e hidróxido u óxido hidratado de cromo III $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Una vez estabilizado el material puede ser utilizado para la fabricación de ladrillos.

Este proceso fue adecuado para tratar los residuos de Química Central, pudiendo lograr que el proceso se realice mezclando tres residuos y sin generar ningún efluente (LAFQA, UNAM). El proceso también permite utilizar agentes reductores complementarios como son el SO_2 o sales de $\text{Fe}(\text{II})$. Lo más complejo del proceso fue lograr el control del mismo, ya que los residuos presentan composiciones variables a través del tiempo y del espacio que ocupa en los depósitos. Asimismo, el poder minimizar el impacto sobre el ambiente.

Las operaciones unitarias involucradas en este proceso son las siguientes: Molienda del material; reducción en un reactor agitado con ácido sulfúrico y agente reductor que puede ser un residuo o una materia prima como el anhídrido sulfuroso; depósito del material tratado en una fosa de descarga y el depósito del material seco que ya no es peligroso en un área de confinamiento o a la planta para producir ladrillos semirefractarios.

1.3 Aspectos legales del control de los residuos peligrosos

En México los residuos peligrosos son regulados de manera específica por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, publicada en el Diario Oficial de la Federación Conforme al artículo 143 de la LGEEPA. que entró en vigor en marzo de 1988. (INE, 1996)

El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, -que en orden jerárquico tiene un rango menor a la LGEEPA pero superior a las normas-, plantea procedimientos de registro e información obligatorios para todo sujeto responsable de la generación, así como los lineamientos de manejo y disposición final, importación y exportación de los mismos. Este reglamento es de observancia en todo el territorio nacional y

su aplicación compete a la Federación a través de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales (INE op. cit.)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), define como materiales peligrosos a:

Elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, representen un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas.

En el caso de los residuos químicos peligrosos, como lo indica la Figura 1.1 éstos se generan en la fase final del ciclo de vida de los materiales peligrosos, cuando quienes los poseen los desechan porque ya no tienen interés en seguirlos aprovechando. Es decir, se generan al desechar productos de consumo que contienen materiales peligrosos, al eliminar envases contaminados con ellos; al desperdiciar materiales peligrosos que se usan como insumos de procesos productivos (industriales, comerciales o de servicios), o al generar subproductos o desechos peligrosos no deseados en esos procesos.

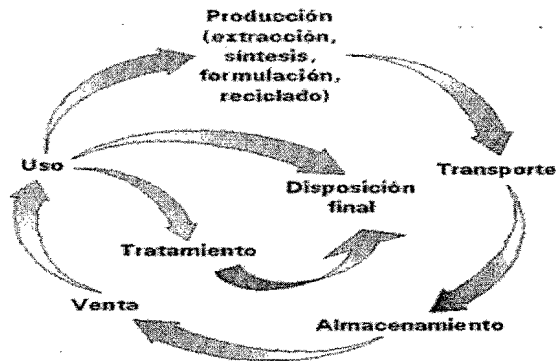


Fig. 1.1. Ciclo de vida de los materiales peligrosos.

La Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL/93 establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos, así como los límites que hacen

a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. De acuerdo con esta norma, los residuos de la producción de pigmentos y compuestos de cromo así como sus derivados constituyen un residuo peligroso. (Diario Oficial de la Federación 1993)

La Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL/93 establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente (PECT). Esta norma también establece que la concentración de cromo hexavalente no debe ser superior a 5.0 mg/L en el extracto ácido.

En la siguiente escala del marco jurídico, se encuentran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de residuos peligrosos (Tabla 3).

Cuadro 1.3 NOM en Materia de Residuos Peligrosos

CLAVE DE LA NORMA	FECHA	DESCRIPCIÓN
NOM-052-ECOL-1993	22/10/1993	Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-054-ECOL-1993	22/10/1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993.
NOM-055-ECOL-1993	22/10/1993	Que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radioactivos.
NOM-056-ECOL-1993	22/10/1993	Que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-057-ECOL-1993	22/10/1993	Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
NOM-058-ECOL-1993	22/10/1993	Que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
PROY-NOM-055-ECOL-1996	11/12/1996	Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que destinarán para un confinamiento controlado y a la instalación de centros integrales para el manejo de residuos industriales peligrosos.
NOM-024-SCT2/2002	22/04/2003	Especificaciones para la construcción y reconstrucción, así como los métodos de prueba de los envases y embalajes de las sustancias, materiales y residuos peligrosos.
PROY-NOM-052-ECOL-2001	26/07/2002	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos.

Fuente: Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas, Secretaría de Economía, 2003.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Planeación

En esta primera etapa se planearon las actividades del laboratorio para obtener información sobre las condiciones de desorción del Cr (VI) del residuo sólido con agua, considerando que el proceso debe ser económicamente viable y ambientalmente aceptable. Para lo cual, las condiciones de reacción obtenidas con base en la experimentación, deben permitir utilizar equipo de bajo costo y seguro; reducir el gasto de energías térmica y cinética; usar reactivos de bajo costo y de menor toxicidad; y establecer sistemas de control simples

En la Figura 2 se presenta un diagrama de la planeación, en la cual se muestran las actividades realizadas y sus interrelaciones.

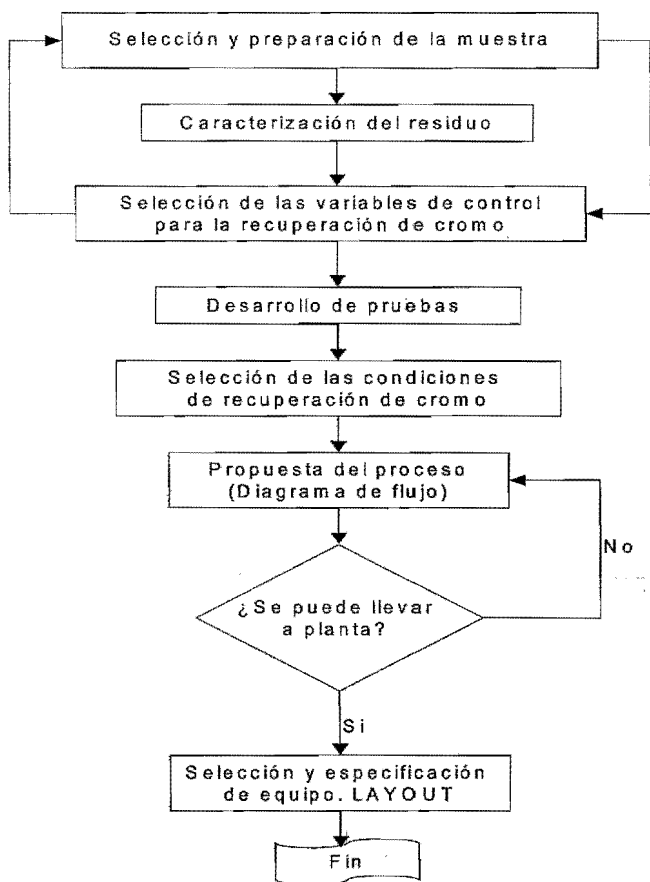
2.2 Selección y tratamiento de las muestras

Se tomaron 8 muestras del depósito de residuo rico en alúmina, seleccionadas con base en la información del personal de la planta y la accesibilidad al sitio de disposición². Las muestras se embalaron en bolsas de polietileno de alta densidad, se etiquetaron y se transportaron al laboratorio, en donde se registraron, se secaron a temperatura ambiente y se almacenaron en un ambiente seco. Posteriormente, cada muestra se homogenizó a través de un proceso de cuarteo y se preparó una muestra compuesta de aproximadamente 8 kg, mezclando 1 kg de cada una. La muestra compuesta se secó a 100°C durante 24 horas, se molió en un molino de bolas y se tamizó hasta obtener partículas de 250 µm (60 mesh). Una vez molida la muestra se volvió a homogenizar y se tomó un 1 kg para realizar los experimentos; conservándose en bolsas de polietileno en un ambiente

² El muestreo fue realizado por personal de la planta y los factores considerados para la toma de muestra aparte de la accesibilidad, fueron: a) tiempo de depósito, exposición al ambiente, nivel de contaminación (mezcla con otros residuos)

seco, (el tratamiento de las muestras se realizo de acuerdo a la norma ISO 11464, "Pre-tratamiento de muestras para los análisis físicos y químicos").

Fig. 2.1 Diagrama del Plan General de Trabajo



2.3 Caracterización del residuo

2.3.1 Parámetros generales

Este tipo de residuo, generado durante la precipitación de la alúmina en la producción de cromatos a partir de cromita³, de acuerdo a Mellado (2002) contiene además de alúmina, algunos cromatos, vanadatos y vestigios de los minerales que no reaccionaron durante la oxidación térmica; como son la cromita, algunas arcillas y sílice.

2.3.2 Contenido de Cr (VI)

Para extraer el Cr (VI) de la matriz sólida se utilizaron dos métodos: a) el método 3060 A de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los EEUUA) y una extracción por ultrasonido. Las pruebas se realizaron por duplicado. En cada grupo de pruebas adicionalmente se analizó una muestra que se preparó con 10 g de residuo y 1 ml de 500 mg de Cr (VI)/L.

En el método 3060 A de la EPA, el Cr (VI) se recupera mezclando 2 g de sedimentos, lodos o suelos con 50 mL de una solución de carbonato e hidróxido de sodio (pH = 13) y calentando a 90°C. Posteriormente, se digiere el extracto adicionando HNO₃ concentrado y calentando hasta evaporación. Posteriormente, el líquido obtenido se filtra y se afora a 100 mL con agua para la posterior cuantificación de Cr (VI).

La extracción por ultrasonido se realizó en un equipo BRANSON. La muestra se mezcló con agua en una relación de 1:5 (masa:volumen). Se prepararon 6 lotes de residuo con 10 g cada uno y se sometieron a ultrasonido a los siguientes tiempos de operación: 10, 30 y 60 minuto. Se filtraron utilizando papel Whatman núm. 40 y se aforaron a un volumen final de 100 mL.

³ La cromita es una espinela de Cr(III) de muy baja solubilidad y presenta baja reactividad, mientras que el cromato es un oxianión con Cr(VI) muy soluble.

En ambas extracciones se cuantificó el Cr (VI) por polarografía y espectrofotometría. Para lo cual, se preparó un estándar de 1 000 mg/L con dicromato de potasio Merck grado analítico y a partir del mismo se preparó un estándar de 100 mg/L y por diluciones sucesivas, las curvas de calibración de 0.01 a 0.1 mg/L. El dicromato usado para la preparación de estándares se secó durante 8 horas a 110°C. Los extractos de las muestras se diluyeron de tal manera que la intensidad de corriente medida correspondiera al intervalo de medición.

Los métodos se describen en el Apéndice A

2.4 Experimentos de extracción

2.4.1 Condiciones generales para la recuperación de cromo

En primer término se seleccionó el agua como extractante y una velocidad de agitación de alrededor de 250 rpm considerando que son condiciones posibles de lograr con el equipo existente en la planta industrial en donde se va a tratar el residuo, y además evitan el uso de reactivos químicos, lo cual se traduce en menores costos, ya sea desde el punto de vista ambiental o económico.

2.4.2 Métodos de cuantificación

La cuantificación del Cr (VI) se realizó inicialmente por polarografía (Método EPA 3060-A) y mediante espectrofotometría UV-visible (Método EPA 7196.A-colorimetría). No se observaron diferencias entre los métodos, a pesar de que la colorimetría es un método que presenta muchas interferencias cuando se utiliza en residuos, posiblemente por la ausencia en la matriz de materia orgánica y otros metales transicionales, como el hierro que incrementa o reduce la señal del cromo en UV, dependiendo si forma pares iónicos o reacciona con la difenil carbacida (Gutiérrez et al).

Considerando que el método colorimétrico es más rápido y de menor costo que el polarográfico; y, sobre todo, a que su límite de detección es más alto, lo que reduce el número de diluciones necesarias, se dejó de utilizar la Polarografía.

2.4.3. Descripción de los experimentos

Relación residuo:agua

En matraces Erlenmeyer de 120 mL, se pesaron 5 lotes de 10 g de residuo agregando los siguientes volúmenes de agua corriente : 15, 20, 25, 30 y 50 mL, respectivamente. El pH de la extracción fue de $\cong 8.2$ debido a la presencia de sulfatos en el residuo. Las muestras se agitaron en un equipo orbital durante 90 minutos, después se dejaron sedimentar durante otros 90 minutos y en el líquido decantado se determinó la concentración de Cr (VI).

Tiempo de extracción de Cr (VI)

En matraces Erlenmeyer se prepararon 10 lotes de residuo de 10 g cada uno con 50 mL de agua destilada. Los matraces se agitaron durante 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 y 5 horas. Posteriormente se sedimentaron durante 90 minutos y se cuantificó el Cr (VI) en el decantado.

Determinación del efecto de adición de ácidos y bases

Se probaron los siguientes valores de pH en el extracto: 0.2, 2.4, 4.5, 7.2, 9.4, 11.6 y 13.5 -adicionando H_2SO_4 o NaOH. Se prepararon 14 lotes del residuo para realizar el experimento por duplicado, colocando 5 g de residuo en vasos de precipitados de 100 mL y agregando 25 mL de solución extractante (ver apéndice A)

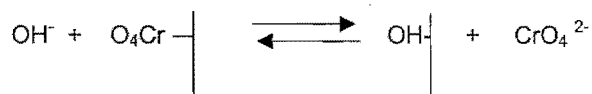
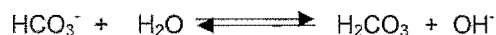
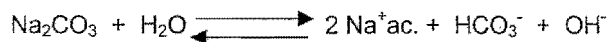
2.4.4 Efecto de la fuerza iónica

El residuo contiene altas concentraciones de sales solubles, especialmente sulfatos y carbonatos de sodio. En estas pruebas se busca evaluar el efecto de la concentración de iones en la solución en la eficiencia de la extracción de cromo, ya sea por competencia o por la disminución del coeficiente de actividad. Esto es, la actividad de un ión soluble, por ejemplo cromatos, es constante si no cambia la temperatura ni la presión. La actividad es igual a la concentración del ión multiplicado por el coeficiente de actividad:

[actividad] = (coeficiente de actividad) (concentración) = $\gamma \cdot a$

Si aumenta la concentración de iones en una solución (fuerza iónica), lo cual se puede medir mediante la conductividad eléctrica, disminuye el coeficiente de actividad, por lo que aumenta la concentración del elemento en la solución de forma de mantener el valor de la actividad constante (Castellan, G.W. 1987). De acuerdo a Langmuir et al. (1999) si γ disminuye de valor cuando aumenta la fuerza iónica, la concentración de cromatos en la solución debe aumentar, produciéndose una sobresaturación.

Además, del efecto de solubilización de los cromatos por el aumento de la concentración de iones en la solución, el carbonato de sodio es una sal básica que aumenta el pH, lo que también aumenta la desorción de cromatos por competencia de los OH^- .



Aunque de acuerdo a las anteriores reacciones se infiere que a mayor pH mayor desorción de cromatos, no conviene subir el pH por arriba de 12 para controlar la solubilización del aluminio, ya que es un metal anfótero.

Experimento 1

Se prepararon 50 mL de soluciones con carbonato de sodio, sulfato de sodio y cromato de sodio a las siguientes concentraciones: 0.2, 2.0 y 25 % w/v. Determinando el pH y la conductividad eléctrica de estas soluciones.

Se tomaron 9 lotes de residuo de 5 g cada uno y agregamos 25 mL de las soluciones salinas respectivamente. Las muestras se agitaron durante 60 minutos y 250 rpm.

El contenido de Cr (VI) extraído se determinó por UV-Visible.

Experimento 2

Se prepararon 9 soluciones de NaCl, Na₂CrO₄ y Na₂CO₃ con las siguientes fuerzas iónicas: 0.5, 1.0 y 3.0; midiendo la conductividad eléctrica y aplicando la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N z_i^2 C_i$$

donde I es la fuerza iónica, z_i es la carga del ion i, y C_i, su concentración.

También se midió el pH y la concentración de Cr(VI) por Espectroscopia de UV-Visible.

Se prepararon mezclas de 5 g de residuo con cada una de las 9 soluciones preparadas de acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior, en una relación 1:5 (sólido: solución). Se agitaron durante 1 h a 250 rpm y posteriormente, se dejaron sedimentar durante 1 ½ h, luego de lo cual se separó la fase acuosa por decantación para determinar el pH, conductividad eléctrica y contenido de Cr(VI) mediante Espectroscopia de UV-Visible.

Experimento 3

Se midió la liberación de cromatos a pH constante, utilizando las tres soluciones de carbonato de sodio con las que se recuperaron las mayores concentraciones de cromatos en el experimento 2. El pH se mantuvo constante (aproximadamente 8.5), mediante una solución amortiguadora de fosfatos.

2.4.5 Extracciones secuenciales con agua

Se realizaron pruebas de extracciones secuenciales con agua para simular el proceso de recirculación del extractante en la planta piloto, cuyo objetivo es reducir el consumo de agua limpia, utilizando las condiciones que liberaron la mayor cantidad de cromatos (sección 2.4.4). En estos experimentos no se controló el pH el cual fue determinado por la composición de cada material, con el fin de simular las condiciones posibles de aplicar en una planta piloto.

En 3 matraces se pesaron 3 lotes de residuo de 10 g cada uno. Al primer lote se le adicionaron 50 mL de agua destilada (relación 1:5, sólido-extractante). La mezcla se agitó durante 1 h y se dejó sedimentar 1.1/2 h. El sobrenadante obtenido se agregó al segundo lote de residuo, adicionando agua destilada hasta completar el volumen de la relación original (1:5, sólido-extractante) y el sobrenadante de esta segunda operación se adicionó al tercer lote, completando el volumen de 50 mL con agua destilada. En el sobrenadante final se determinaron el cromo hexavalente por UV visible, la conductividad eléctrica y el pH.

2.4. 6 Extracciones con solución salina

Además del residuo rico en aluminio y cromatos, en la planta hay aproximadamente almacenados 450 000 toneladas de otro residuo, que se generó en los hornos de oxidación de la cromita. Estos desechos son ricos en carbonatos de sodio, materia prima que se agrega a la cromita para facilitar la oxidación de la misma (García, 1998), y conforma una excelente fuente de carbonatos de sodio para preparar una solución extractante de alta Conductividad y con un pH básico (de 8 a 10).

Para el experimento se utilizaron: 1 parte en peso de residuo rico en alúmina (5 g) x 4 partes en peso de residuo de los hornos (1, 3, 5, 7 g) x 1 volumen de agua (25 mL) x 1 tiempo de agitación (1 hora) x 1 velocidad de agitación (250 rpm) x 2 repeticiones = 8 soluciones

En cada solución se determinó el contenido de cromatos, el pH y la conductividad eléctrica.

2.4.7. Extracciones secuenciales con solución salina preparada con residuos ricos en carbonatos

Se realizaron extracciones secuenciales usando como fuente de sales el residuo rico en carbonatos de sodio (procedente de los hornos). De los resultados de los experimentos descritos en la sección 2.4.6 se seleccionaron las condiciones de

extracción: 5 g de residuo rico en cromatos y alúmina, 5 g de residuo rico en carbonatos, 25 mL de agua destilada, 1 hora de agitación a 250 rpm y 1.1/2 h de sedimentación.

Se prepararon 3 lotes con los residuos sólidos, se adicionó al primero 25 mL de agua y se procesó bajo las condiciones antes descritas. El sobrenadante se adicionó al segundo lote completando el volumen con agua destilada (relación 1:5), se repitió la operación y el sobrenadante se adicionó al tercer lote (Fig. 2.1). La solución final de la primera secuencia de extracción se conservó para analizar Cr (VI), pH y conductividad eléctrica.

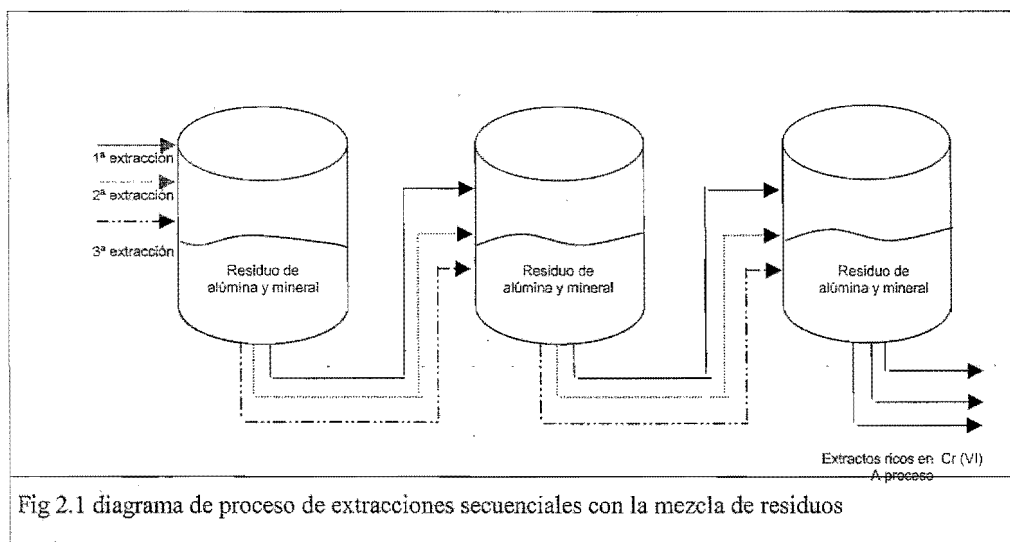


Fig 2.1 diagrama de proceso de extracciones secuenciales con la mezcla de residuos

El proceso se repitió dos veces más, pero utilizando los residuos del primer y segundo experimentos consecutivamente, con el fin de probar si convenía realizar más de una extracción. Se conservaron las soluciones finales de cada extracción para analizar su contenido de cromatos, pH y conductividad eléctrica.

2.4.8. Extracciones secuenciales con agua y solución de carbonatos de sodio

El objetivo de este experimento fue el de evaluar la eficiencia de un lavado con agua y otro con solución de carbonatos de sodio preparada con reactivo grado analítico. El lavado con agua destilada, libera los cromatos más fáciles de desorber y en el segundo lavado, una solución 0.1 M de carbonato de sodio ($\text{pH} > 8$), con la cual se favorece la desorción de los cromatos por competencia aniónica de los CO_3^{2-} y OH^-

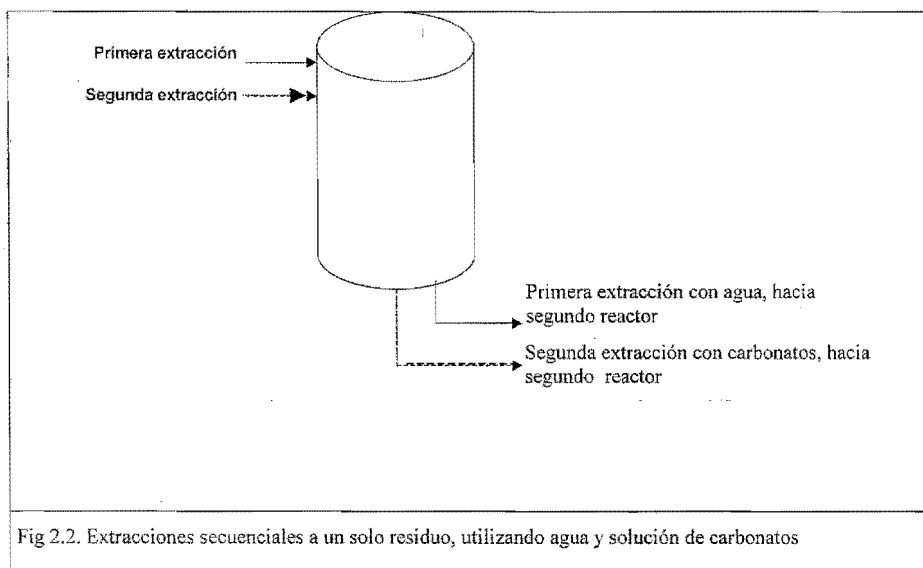


Fig 2.2. Extracciones secuenciales a un solo residuo, utilizando agua y solución de carbonatos

Se procedió de la siguiente manera:

Se cargó el reactor con 200 g de residuo, se adicionó 1 L de agua, se agitó 1 hora a 250 rpm, se dejó sedimentar 1 ½ h y se recuperó el sobrenadante, el cual se adicionó a un segundo lote de 200 g de residuo. Se repitió la operación dos veces hasta obtener una solución final a la cual se determinó su contenido de cromatos, pH y conductividad eléctrica.

Los residuos lavados con agua se sujetaron a un proceso igual al anterior pero utilizando una solución de carbonatos 0.1 M. Se recuperó la solución final y se analizó el contenido de cromatos, pH y conductividad eléctrica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Contenido de Cr (VI) en el residuo

Las concentraciones de Cr (VI) determinadas en 3 lotes de la muestra por el método EPA 3060 A, en el que se extrae el Cr (VI) en solución alcalina (pH= 12.7) con agitación mecánica y calentamiento a 90 ° C grados (ver apéndice A), se presentan en el Cuadro 3.1

Cuadro 3.1 Concentración de Cr(VI) en el residuo extraído por el método EPA 3060 A

Lote	Relación (residuo : agua)	Cr (VI) en la solución mg/kg	(%, masa/masa)	Promedio (%, masa/masa)
1	1:5	995.15	9.95	9.93
2	1:5	987.31	9.87	
3	1.5	996.92	9.96	

El contenido de cromo hexavalente de los tres lotes tratados es menor al obtenido por González M, (2002) en muestras de este residuo, ya que en este estudio se obtuvo un % promedio de 9.93 y la autora citada obtuvo uno de 12.26 %. Esto posiblemente se debe: a) diferencias en el método de solubilización, ya que González M, (ibidem) realizó una digestión ácida en la que la destrucción del residuo es mayor que en la extracción básica utilizada en este estudio; b) analizó muestras individuales y no compuestas; y c) midió el cromo por absorción atómica (cromo hexavalente y trivalente)¹, mientras que

¹ Los residuos pueden contener vestigios de cromita rica en Cr(III)

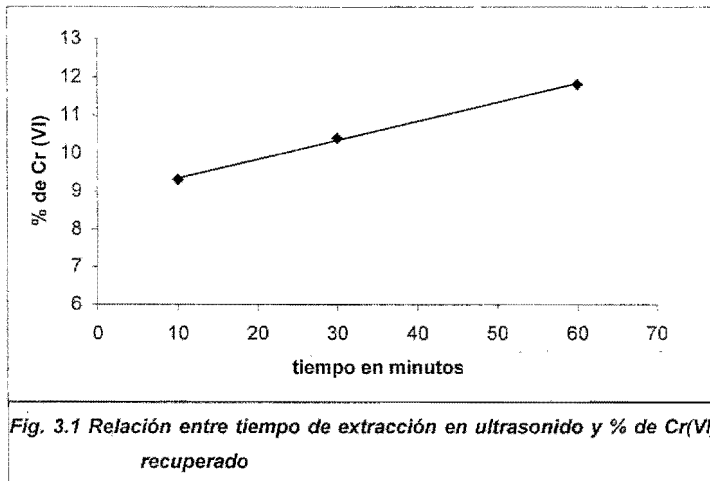
en este estudio, no se cuantificó el cromo total, sino se utilizaron métodos de extracción y cuantificación específicos para Cr(VI).

En el cuadro 3.2, se reportan las concentraciones de Cr (VI) en el residuo, obtenidas a diferentes tiempos, con mediante ultrasonido. En la Figura 3.1 se aprecia claramente la dependencia lineal de la desorción del Cr(VI) con los 3 tiempos de extracción probados. Sin embargo bastan 10 minutos de ultrasonido para obtener mucho mayor porcentaje de recuperación que la obtenida mediante una extracción drástica en medio básico (EPA 3060) con agitación mecánica. Si se considera el porcentaje de desorción a una hora de operación, se puede notar que el contenido de cromo cuantificado es similar al obtenido mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (González, 2002) que fue de 11.8. Este resultado aporta fuertes evidencias de que la mayor parte del cromo total presente en el residuo corresponde a Cr(VI) y que hay un porcentaje importante ocluido.

Cuadro 3.2 Concentración de Cr(VI) en el residuo, obtenida mediante extracción básica con ultrasonido

Núm.de lote	Tiempo min.	Cr (VI) (mg/kg)	Cr (VI) (m/m)	%	Promedio %(m/m)
1	10	18,537	9.23		9.30
		18,815	9.37		
2	30	21,365	10.64		10.39
		19,067	10.14		
3	60	21,617	11.66		11.95
		24,168	12.03		

Como los residuos estudiados se formaron cuando se redujo el pH de la solución generada en las cubas de lavado, en que se precipitó el hidróxido de aluminio con las impurezas, en consecuencia es que la mayor parte corresponda a cromatos solubles o adsorbidos (complejos de esfera externa relativamente lábiles). Sin embargo, como inclusive con 60 minutos de ultrasonido en una solución rica en carbonatos, no se alcanzó a recuperar la misma concentración de cromo que por digestión ácida (González 2000) que fue de 12.26, se considera que una pequeña parte del Cr(VI) se encuentra físicamente ocluida o en formas insolubles.



A continuación se describen 4 posibilidades para explicar las diferencias de disponibilidad de cromo en los residuos:

- a. Cromatos solubles que se recuperan con agua sin ningún tratamiento especial
- b. Cromatos adsorbidos (esfera externa) que requieren para liberarse de procesos de intercambio iónico con otros aniones como son los carbonatos. En estos residuos posiblemente son los carbonatos

(zpc² calcita = 9.5) y los hidróxidos de aluminio (zpc del γ Al_2O_3 = 8.5) quienes los retienen en su superficie

- c. Cromatos ocluidos, cuya liberación esta controlada por la difusión. Posiblemente son cromatos unidos al calcio o a otros cationes que se quedan atrapados en la matriz porosa; y que se liberan en el laboratorio por efecto del ultrasonido. Parte de estos cromatos son, posiblemente, los que solubilizan lentamente por lixiviación por efecto del CO_2 del agua.
- d. Cromatos prácticamente insolubles que se recuperan con extracciones muy drásticas como digestiones ácidas y fusiones alcalinas. De acuerdo a Geelhoed, et al. (2002) pueden ser aquellos minerales que no reaccionaron en el horno (cromita), o minerales secundarios insolubles formados a altas temperaturas (brownmorilonita), o minerales secundarios que resultan del intemperismo, como son el hidrogarnet sustituido con Cr(VI) $[\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{H}_4\text{O}_4, \text{CrO}_4)_3]$ y la hidrocalumita -Cr(VI) $(\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\text{CrO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O})$, que es una arcilla con doble capa de hidróxidos y cromatos sostenidos entre las capas. Probablemente estos minerales también ocluyen cromatos en sus poros.

3.2 Optimización de las condiciones de extracción de Cr (VI) en el residuo

3.2.1 Relación residuo : agua

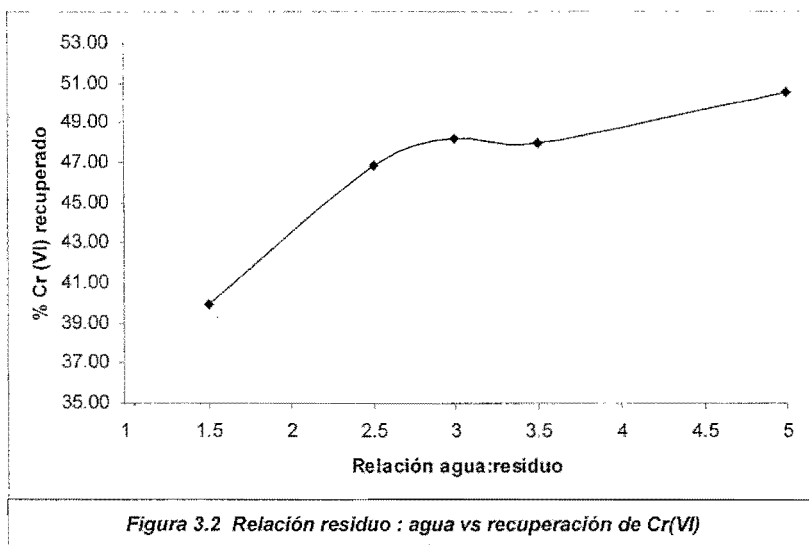
Para realizar un estimado de las concentraciones de Cr (VI) extraído del residuo, se tomó como base que el material seleccionado para experimentación tenía 12 % de Cr (VI)

² punto de carga cero.

Se probaron diferentes relaciones de agua que variaron de 1:1.5 hasta 1:5 (residuo : agua), ya que para escalar el proceso a nivel industrial se requiere gastar la menor cantidad de agua. Como se observa en el Cuadro 3.3 y Figura 3.2 hay una correlación directa entre la proporción de agua : sólido y la concentración de Cr(VI) (coef. de correlación = 0.94). Esto es, la recuperación aumenta significativamente con mayor cantidad de agua, lo que además facilita el manejo de la mezcla. No obstante, se seleccionó la relación 1:5 (10 g residuo:50 mL de agua) para los experimentos en el laboratorio y para el proceso en planta, ya que con menos agua se formaba una pasta muy difícil de manejar. No se probaron relaciones mayores pues se obtendría una solución muy diluida que obligaría a un manejo de grandes volúmenes de agua, lo que implicaría un impacto ambiental colateral muy alto y un aumento en los costos de manejo.

Cuadro 3.3. Efecto de la relación residuo- agua para la extracción de cromo del residuo

Relación residuo: agua	% Cr (VI) extraído
1:1.5	39.92
1:2.0	46.80
1:2.5	48.22
1:3.0	47.97
1:5.0	50.51



3.2.2 Tiempo de extracción de Cr (VI)

En el cuadro 3.4 se muestra las diferentes cantidades de Cr(VI) recuperadas a diferentes tiempos con agitación orbital a 250 rpm. La concentración de cromo aumenta con el tiempo de agitación, pero como se observa en la Figura 3.3 a partir de los 60 minutos la pendiente de la curva disminuye, y los cambios en concentración respecto al tiempo son mínimos.

Por lo tanto, para fines industriales resulta más conveniente agitar una hora y obtener un rendimiento de 56.6 %. Para extraer una mayor cantidad de cromo hexavalente se requiere de una segunda extracción, pues dos extracciones secuenciales gastan menos energía y su costo es menor que agitar 4 horas más para solamente aumentar un 6.86% de cromo recuperado.

Cuadro 3.4 Porcentaje de Cr(VI) extraído por agitación orbital a 250 rpm a diferentes tiempos

Tiempo de extracción (h)	0	0.5	1	2.5	3	3.5	4	5
%Cr (VI) extraído	11.27	52.54	56.61	56.95	58.73	59.15	61.02	63.47

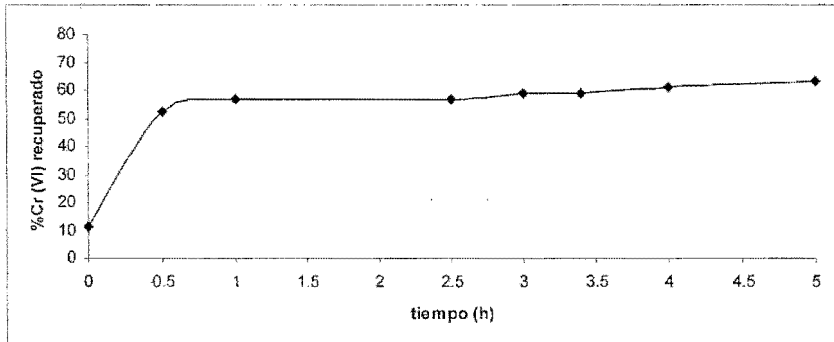


Figura 3.3. Concentración de cromo extraído en función del tiempo de agitación

3.2.3 Determinación del efecto de adición de ácidos y bases

En el cuadro 3.5 se observa que las mayores concentraciones de Cr(VI) se extraen a pH extremos y la menor a pH 7.

Cuadro 3.5 Efecto del pH en la cantidad de cromo extraído del residuo

pH inicial	pH final	Adición H ₂ SO ₄ moles/L	Adición de NaOH moles/L	% Cr (VI) recuperado
0.2	7,92	0.1 M	0.0	68.47
2.4	7,93	0.5 M	0.0	60.22
4.5	8,06	1 M	0.0	54.89
7.2	8,08	0.0	0.0	47.93
9.4	8,06	0.0	0.1 M	54.80
11.6	8,15	0.0	0.5 M	58.93
13.6	13,96	0.0	1 M	68.70

En la Figura 3.4 se observa que la relación entre pH y Cr(VI) presenta una tendencia similar a la de la disolución de alúmina, aunque el mínimo se presenta a un pH ligeramente menor. Esto se puede deber al tipo de hidróxido u óxido que se formó en el residuo o a la presencia de pequeñas cantidades de otros minerales con diferente grado de solubilidad que pueden alterar ligeramente la liberación del cromo, como es el caso de los carbonatos.

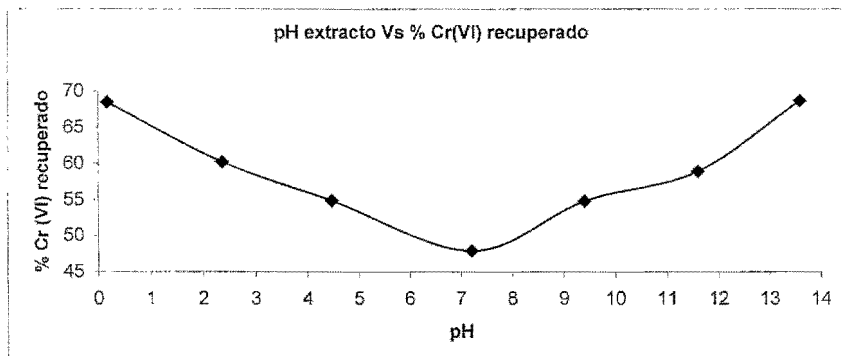


Figura 3.4 Porcentaje de Cr(VI) extraído

Como se puede observar en el Cuadro 3.5 la capacidad amortiguadora del residuo es alta, ya que con excepción de la adición de sosa hasta un pH 13,6 los valores finales de pH son de alrededor de 8, que corresponde al de los bicarbonatos. La liberación del cromato a diferentes pH (Figura 3.4) es proporcional a la disolución de la alúmina que es anfótera. El 48% del Cr(VI) se libera a pH neutro, mientras que a pH extremos aumenta hasta 68% aproximadamente.

La mayor concentración de Cr(VI) que puede estar adsorbida y ocluida en la alúmina es aproximadamente del 20% ya que es la diferencia entre la concentración obtenida a pH =13.6 y pH =7. El cromo que no se recupera corresponde al ocluido en zonas internas de los sólidos de la matriz que se no se disolvieron a las condiciones de extracción básica (adición de OH⁻ en concentración casi 1 M), ya sean carbonatos, otros minerales o alúmina

resistente al ataque básico o al presente en minerales insolubles. Parece que los carbonatos no tienen ocluida una gran cantidad de cromatos en sus poros, ya que disminuyendo el pH a 0, al cual ya se destruyeron, el porcentaje de recuperación de cromo es similar al obtenido a pH 13.6, donde permanecen como sólidos. Este fenómeno posiblemente se debe a que la concentración de carbonatos es mucho menor que la de la alúmina. Para liberar totalmente al cromo, posiblemente son necesarias adiciones de base y ácido que superen la capacidad amortiguadora y disuelvan la mayor parte de la alúmina; así como mantener condiciones de presión y temperatura suficientemente altas como para atacar a los minerales formados en el horno y aquellos que son producto del intemperismo de más o menos 20 años de exposición.

Cuadro 3.6. Concentración de Cr (VI) recuperada (en %) en una relación 1:5 (sólido:agua) con diferentes técnicas de extracción a diferentes pH

pH	pH=8 (Agua)	0	2.4	4.5	7.2	9.4	11.6	13.6
Sin agitación	35.4	48.3	46.65	43.12	37.03	35.44	40.02	42.46
Agitación mecánica	41.92	68.47	60.22	54.89	47.93	54.80	58.93	68.70
Ultrasónico	67.51	72.52	71.22	69.86	68.95	78.07	86.58	89.75

3.2.4 Efecto de adición de sales (intercambio y fuerza iónica)

Experimento 1

Carbonatos

En el cuadro 3.7 se puede observar que un medio básico (presencia de OH^-) se recuperan más cromatos que con agua neutra. Sin embargo, la presencia de carbonatos y OH^- ($\text{pH} > 12$) aumenta en mayor proporción la recuperación de cromatos. Los rendimientos son superiores a los obtenidos con agua e incluso

con OH⁻ (sosa) a valores de pH similares (Figura 3.4); lo cual implica que los carbonatos (CO₃²⁻) son aniones que compiten favorablemente con los cromatos (CrO₄²⁻).

En el caso de los sulfatos, la recuperación de cromo es menor, pues a pesar de haber aumentado la concentración del sulfato de sodio 10 veces en cada ocasión, la recuperación sólo aumenta en unas pocas unidades de porcentaje..

Estos resultados indican que la recuperación de cromatos se debe a procesos de competencia por sitios de adsorción y no a un efecto del aumento de la fuerza iónica; lo cual es congruente con el hecho de que los cromatos no precipitan más que con plata, bario y plomo; y, por lo tanto, su retención se debe, principalmente, a fenómenos de adsorción en la alúmina y, en parte, a oclusión en este mismo sólido.

Cuadro 3.7. Efecto de las sales disueltas en el extractante en la extracción de cromo del residuo; conductividad y pH antes y después de la extracción. Con una relación residuo:extractante de 1:5 agitando durante 1h a 250rpm.

Carbonato de sodio (hidrólisis básica)						
Concentración masa / volumen	Concentración mol/L	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad final mS/cm	pH final	%Cr(VI) recuperado
0.2	0.018	3.65	12.25	70.7	8.07	81.00
2.0	0.18	24.2	12.76	75.7	10.39	83.39
25	2.25	99.1	12.79	93.2	11.42	88.06

Sulfato de sodio (hidrólisis neutra)						
Concentración masa / volumen	Concentració n mol / L	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad Final mS/cm	pH final	%Cr(VI) recuperado
0.2	0.014	2.91	6.72	70.1	7.97	76.97
2.0	0.143	21.4	6.26	76.8	8.13	77.01
25	1.766	115.1	6.34	95.4	7.11	81.84
Cromato de sodio (hidrólisis básica)						
Concentración masa / volumen	Concentració n Mol / L	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad final mS/cm	pH final	%Cr(VI) recuperado
0.2	0.0062	2.02	8.85	69.2	8.04	76.66
2.0	0.0618	15.37	9.51	75.7	8.15	77.21
25	0.7716	115.4	10.16	124.8	8.24	78.77

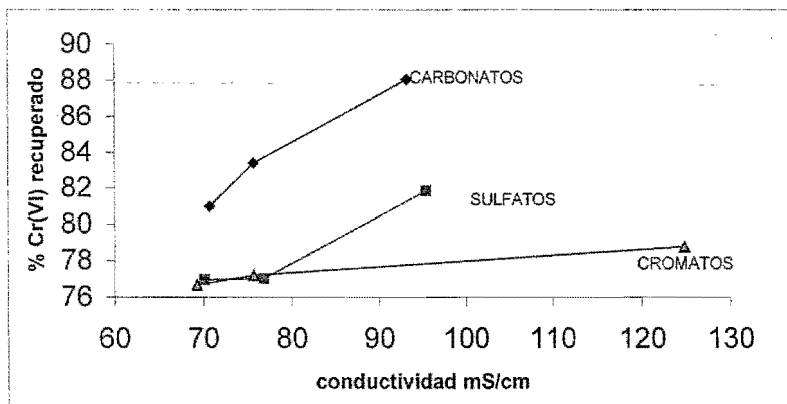


Fig. 3.5. Concentración de cromo extraído en función de las sales como extractante, con una relación residuo : extractante de 1 : 5 agitando durante 1h a 250rpm.

Experimento 2

En este experimento se confirmaron los resultados del experimento 1, que indican que la fuerza iónica no es un factor determinante en la recuperación de los cromatos y que la solución de carbonatos permite recuperar la máxima concentración de este oxianión (figura 3.5).

Cuadro 3.8. Efecto de las sales disueltas en el extracto para la recuperación de cromo del residuo; fuerza iónica constante y pH libre.

NaCl						
Fuerza iónica I	Concentración M	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad final mS/cm	pH final	% Cr (VI) extraído
0.5	0.5	42.3	7.1	78	7.93	67.24
1	1.0	82.6	7.03	107.85	7.78	66.83
3	3.0	174.6	.05	175.2	7.39	61.38
Na ₂ CO ₃						
Fuerza iónica I	Concentración M	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad final mS/cm	pH final	% Cr (VI) extraído
0.5	0.16	18	12.73	57.55	10.68	75.96
1	0.33	31.2	12.71	64.1	11.68	78.76
3	1.0	66	12.62	86.3	11.76	82.09

Na ₂ CrO ₄						
Fuerza iónica I	Concentración M	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad final mS/cm	pH final	% Cr (VI) extraído
0.5	0.16	24.7	8.72	62.55	8.20	66.43
1	0.33	44.1	10.11	77.1	8.29	65.35
3	1.0	97.2	10.15	111.75	8.42	65

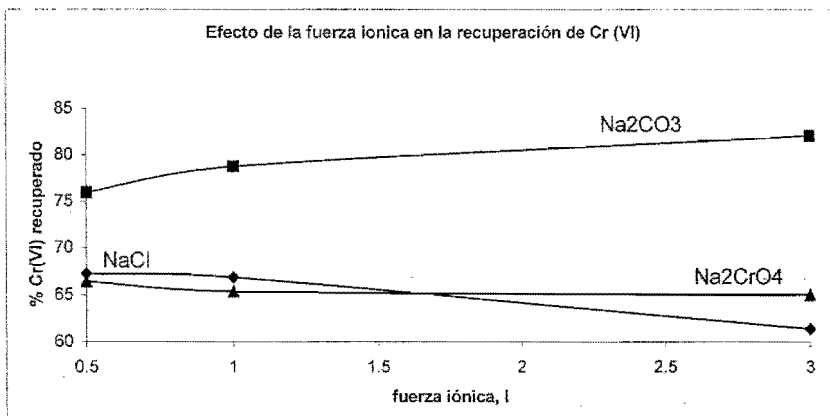


Fig. 3.6. Efecto de la fuerza iónica en la recuperación de cromo hexavalente en el residuo a un cambio de pH libre

pH controlado

Con los resultados obtenidos en la sección anterior, vemos que la máxima recuperación se da con carbonato de sodio, por lo que se decidió trabajar con este a un pH controlado.

Cuadro 3.9 Efecto de las sales disueltas en el extracto para la recuperación de cromo del residuo; fuerza iónica constante y pH controlado.

Na ₂ CO ₃						
Fuerza iónica I	concentración M	Conductividad inicial mS/cm	pH inicial	Conductividad final mS/cm	pH final	% Cr (VI) recuperado
0.5	0.16	24.1	8.54	62.65	8.15	66.02
1	0.33	43.2	8.57	73.25	8.25	67.4
3	1.0	99.5	8.62	102.15	8.35	69.2

Cuando la solución contiene carbonatos y el pH aumenta sin adicionar ninguna solución amortiguadora, la cantidad de cromatos recuperada aumenta (cuadro 3.8) como también se puede observar, a su vez, la recuperación de cromatos es menor cuando se adicionan carbonatos pero se controla el pH con una solución amortiguadora de fosfatos a un valor de aproximadamente 8.5 (cuadro 3.8).

Por los resultados obtenidos se infiere que en la liberación del cromo hexavalente, existe un efecto combinado de la disolución de la alúmina (ver apéndice C) y de la competencia de los carbonatos (CO₃⁻²) con los cromatos (CrO₄⁻²) adsorbidos.

Se plantea que son dos factores los involucrados, ya que si solamente influyera la disolución de la alúmina en la liberación de los cromatos, se obtendría la misma concentración de cromatos a un determinado pH, no importando si se alcanza con una solución de sosa cáustica o una solución de carbonatos.

En síntesis los dos factores determinantes son:

- la disolución de la alúmina, ya que se disuelve a pH altos por ser un compuesto anfótero (Apéndice C), permitiendo la liberación de los

cromatos ocluidos.

- b) La competencia de los carbonatos, ya que a mayor pH predominan los carbonatos sobre los bicarbonatos, como se puede observar en el apéndice C.

3.3 Condiciones de recuperación de Cr (VI)

A continuación se describen los resultados de los experimentos de optimización de la recuperación del cromatos, realizados bajo las siguientes condiciones:

- a) una hora de agitación,
- b) relación 1:5 (sólido:extractante)
- c) pH de 8.5 a 11 , ya que aunque arriba de este valor se logra la mayor liberación de cromatos, se busca evitar la disolución total de la alúmina pues contamina la solución.

3.3.1 Extracciones secuenciales con agua

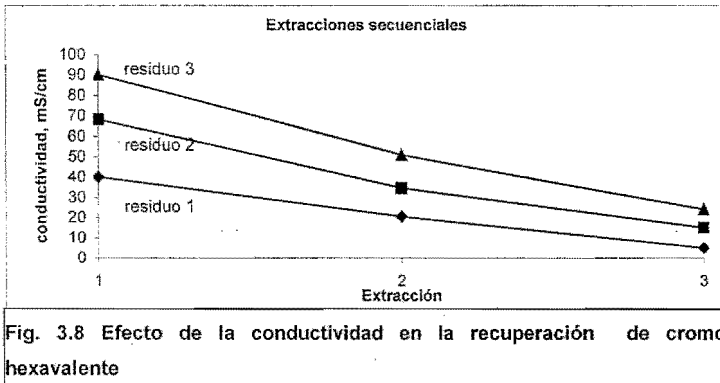
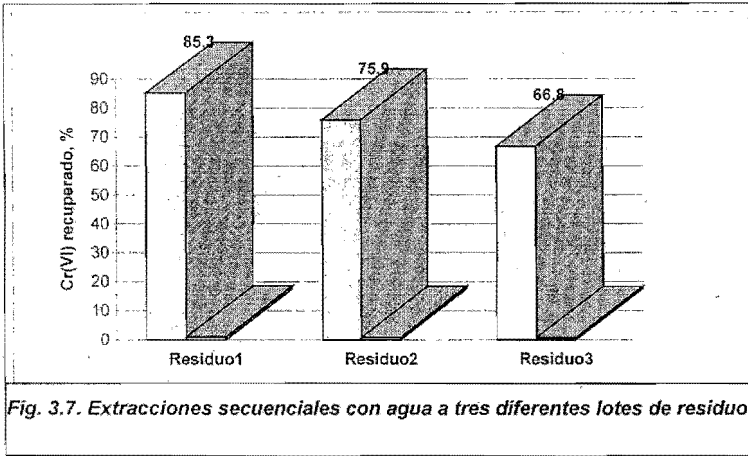
De acuerdo a los resultados que se muestran en el cuadro 2.8, con tres extracciones con agua se recuperan de un valor máximo de 85.4% del cromo total para el residuo 1 de menor conductividad eléctrica, disminuyendo progresivamente la cantidad liberada hasta 66.8% para el residuo 3 de mayor conductividad eléctrica (Cuadros 3.10 y 3.11, Figura 3.7). Asimismo, la primera extracción realizada con agua pura recupera mayor cantidad que las siguientes extracciones en las cuales se utilizaba el extracto de la anterior con mayor conductividad eléctrica (Figura 3.8)

Cuadro 3.10 % de recuperación de Cr(VI) mediante extracciones secuenciales con agua.

<i>Primera Extracción</i>	Residuo1	Residuo2	Residuo3
Cr (VI) TOTAL EXTRAÍDO, %	44.9	26.9	36.8
Agua recuperada, ml	40.0	37.0	34.5
Conductividad eléctrica, mS/cm	40.2	68.3	90.2
pH final	8.86	9.23	9.65
<i>Segunda Extracción</i>			
Cr (VI) TOTAL EXTRAÍDO, %	23.3	25.4	15.3
Agua recuperada, ml	48	49	50
Conductividad eléctrica, mS/cm	20.6	34.8	51.1
pH final	8.62	9.25	9.54
<i>Tercera Extracción</i>			
Cr (VI) TOTAL EXTRAÍDO, %	17.2	23.7	14.7
Agua recuperada, ml	49	50	50
Conductividad eléctrica, mS/cm ²	5.02	15.08	24.2
pH final	8.56	8.72	8.83

Cuadro 3.11. Cromo total recuperado en las tres extracciones.

	Residuo1	Residuo2	Residuo3
Cr (VI) RECUPERADO, %	85.33	75.93	66.80
Total agua gastada, ml	138	146	134.5



En este experimento se confirmó que un factor poco determinante en la recuperación de cromatos es la fuerza iónica que no aumenta, como se había demostrado con el experimento 3, sección 3.2.5, pero los sólidos disueltos en la solución extractante si disminuyen la liberación de los cromatos.

3.3.2 Extracciones con solución salina

En este experimento se determinó la viabilidad de extraer el cromo hexavalente del residuo formado básicamente por alúmina y cromatos (alúmina), utilizando

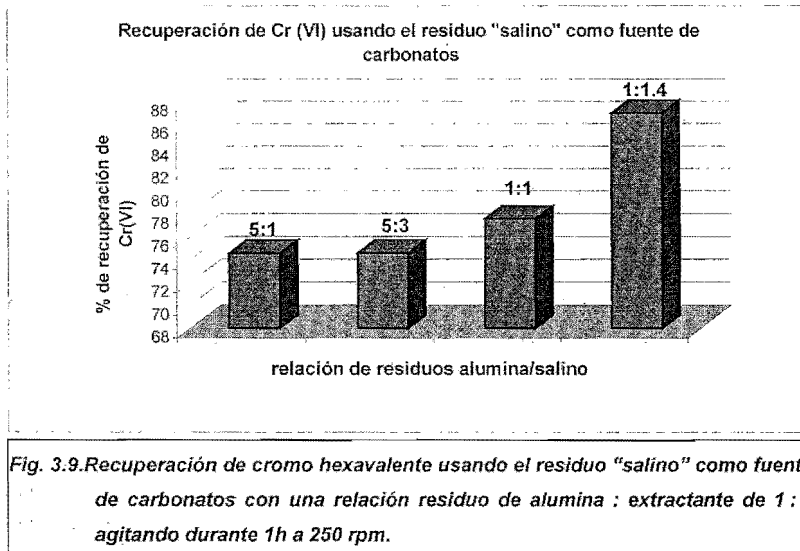
el residuo generado en los hornos de oxidación que contiene cromita, cromatos y carbonatos (mineral).

La concentración total de cromo en el residuo aumenta ya que la solución de carbonatos obtenida del lixiviado del residuo procedente de los hornos de oxidación, libera también cromato (cuadro 3.12). Para realizar el cálculo de cromo extraído se tomo en cuenta el contenido en el residuo mineral.

El Cuadro 3.12 muestra que a mayor cantidad de residuo mineral mezclado con el residuo de alúmina, aumenta la recuperación de Cr (VI), llegándose a obtener una recuperación del 87.12 del cromo total.

Cuadro 3.12. Recuperación de cromo mediante su mezcla con residuos minerales ricos en carbonatos de sodio (relación agua: sólido 1: 5, 1h de agitación a 250 rpm).

Relación de residuos alúmina : mineral	pH del extracto	cond. elec. mS/cm ²	Cr (VI) liberado %
5:1	8.88	44.85	74.21
5:3	9.68	45.95	74.61
1:1	10.12	46.8	77.59
5:7	10.30	47.8	87.12



El aumento de carbonatos solubles se puede apreciar por el aumento de la conductividad eléctrica que es una medida inherente de la cantidad de iones en la solución y del aumento progresivo del pH a medida que la relación de los residuos alúmina : mineral aumenta.

Sin embargo, si se utilizan los residuos minerales como fuente de carbonatos conviene usar el lixiviado y no la mezcla de residuos, pues esta operación evitaría el reuso de la alúmina sólida, y obligaría al manejo de grandes cantidades de sólidos húmedos. La solución final recuperada de la alúmina se podría enviar a la planta de tratamiento de aguas residuales que ya existe y que reduce a los cromatos, recuperando un precipitado rico en Cr(III).

3.3.3 Extracciones secuenciales con solución básica generada con residuos minerales

Los resultados indican que la solución preparada con residuos minerales, por su alta conductividad no logra recuperar un porcentaje mayor al 54 %, que es

mucho menor que el 85.4 % obtenido con agua pura, quedando una cantidad de cromatos suficiente para que el residuo continúe siendo clasificado como peligroso, de acuerdo a la NOM 052.

Cuadro 3.13. Cromo recuperado mediante extracciones secuenciales en tres residuos, utilizando las sales del residuo salino como extractante			
Primera Extracción	Residuo1	Residuo2	Residuo3
Cr(VI) TOTAL EXTRAÍDO, %	22.8	22.5	24.6
Agua recuperada, mL	30.6	32.8	37
Conductividad eléctrica, mS/cm²	20.6	52.8	77.4
pH	8.5	8.7	10.16
Segunda Extracción			
Cr(VI) TOTAL EXTRAÍDO, %	23.1	18.9	10.1
Agua recuperada, mL	50	50	50
Conductividad eléctrica, mS/cm²	35.4	45.0	63.4
pH	9.52	9.59	9.74
Tercera extracción			
Cr(VI) TOTAL EXTRAÍDO, %	8.6	12.11	9.7
Agua recuperada, mL	50	50	50
Conductividad eléctrica, mS/cm²	9.67	15.3	24.2
pH	9.2	9.65	10.16

Cuadro 3.14. Cromo total recuperado en las tres extracciones.

	Residuo1	Residuo2	Residuo3
%Cr(VI) RECUPERADO	54.5	53.5	44.4
Total agua gastada, ml	130.6	132.8	137.0

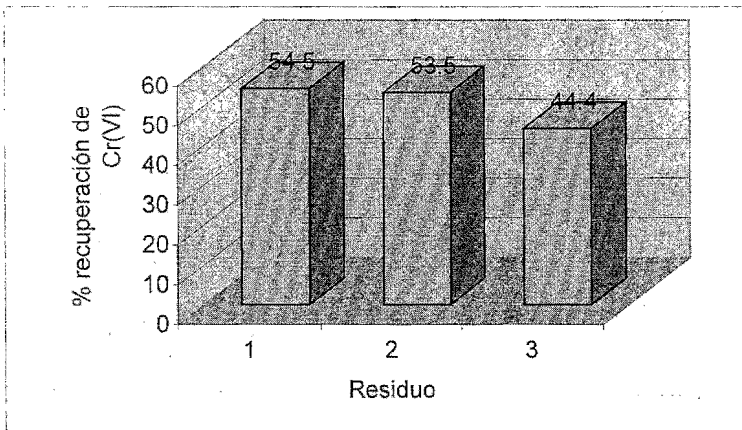


Fig. 3.10 Cromo recuperado de las extracciones secuenciales utilizando el residuo salino

3.3.4 Extracciones secuenciales con agua y solución de carbonato de sodio

Se probó un lavado con agua y otro con una solución de carbonato de sodio. Como se observa en el cuadro 3.15, con la extracción sucesiva utilizando agua y carbonatos se obtienen mejores resultados que con agua y similar a la realizada con carbonatos, pero se requiere un menor gasto de esta sustancia.

Posiblemente el agua libera los cromatos solubles débilmente retenidos por la alúmina y los carbonatos disuelven parcialmente a la alúmina y compiten con

los cromatos adsorbidos.

Cuadro 3.15 Cr(VI) extraído con dos lavados, el primero con agua y el segundo con solución de carbonatos

	LOTE 1		LOTE 2	
	Lavado con agua	Lavado con solución de carbonatos	Lavado con agua	Lavado con solución de carbonatos
% de Cr(VI) recuperado	55.6	31.6	51.7	32.4
Extracto recuperado, L	0.8	0.8	0.9	0.8
Total de Cr(VI) recuperado, %	87.2		84.1	
Conductividad	70.2	75.3	70.1	73.5
pH final	8.16	9.32	8.11	9.25

Total de agua gastada 2.4 L por dos lotes

3.4 Selección de las condiciones de extracción

Se analizaron las siguientes opciones:

- Extracciones secuenciales con agua (ESA)
- Extracciones secuenciales con mezcla de los dos residuos(ESMR)
- Extracciones secuenciales con agua y carbonatos(ESAC)

En el cuadro 3.16 se presentan las concentraciones de Cr (VI) recuperadas con las diferentes extracciones secuenciales. El mayor porcentaje de recuperación se obtuvo con la extracción ESAC, seguida por la ESA; mientras

que la ESMR resultó de baja eficiencia.

Cuadro 3.16 Cr(VI) recuperado(%), mediante de los distintos métodos de extracciones secuenciales

Extracción	ESA	ESMR	ESAC
primera	44.9	22.8	55.6
segunda	23.3	23.1	31.6
tercera	17.2	8.6	na
total	85.33	54.5	87.2
Agua gastada, mL	146	130.6	90
Residuo tratado, g	30	30	20

Al realizar la extracción secuencial con agua en el primer lavado y carbonatos (0.1M) en el segundo los resultados fueron los que se muestran en la tabla 3.16 y como se observa además de obtener una recuperación de aproximadamente 87 %, se redujo el consumo de agua.

La extracción con agua permite recuperar una cantidad similar de Cr (VI) a la obtenida con carbonatos, pero se requieren 3 extracciones secuenciales con agua para alcanzar la eficiencia que se obtiene con dos extracciones (agua seguida de solución de carbonatos); en consecuencia, la extracción con agua requiere de un mayor gasto de agua que cuando se utilizan los carbonatos. Para lixiviar el total de residuos ricos en alúmina (12 000 ton) se necesitan aproximadamente 60 000 toneladas de agua (relación 1 : 5, residuo : extractante).

La extracción de la mezcla de residuos (ESMR) solamente permite recuperar alrededor del 50% del Cr(VI) de agua por la cantidad que se pierde retenido

en el material sólido.

Considerando estos resultados, así como los requerimientos de equipos, el tipo y cantidad de materias primas que exige el proceso de recuperación de Cr(VI), así como la posibilidad de poder reintegrar la corriente de Cr(VI) a la planta de fabricación de sulfato básico de cromo, se estableció que la extracción más eficiente es la que se lleva a cabo en dos pasos sucesivos con agua y solución de carbonatos y, por lo tanto, se utilizó como base del diseño de la ingeniería.

4. DISEÑO

4.1 Descripción del proceso

El proceso de recuperación de Cr(VI) consiste en la desorción de cromo hexavalente contenido en el residuo de alúmina mediante una serie de lavados, para su posible uso y comercialización. Los lodos generados se someterán a un segundo proceso para recuperación de aluminio.

El proceso de recuperación de cromo hexavalente consta de cuatro etapas básicas (figura 4.1)

- Acarreo del residuo
- Trituración y molienda
- Lavado del residuo
- Clarificación de los lodos
- Disposición del residuo lavado y del extracto recuperado.

La planta de recuperación contará con las siguientes áreas básicas: a) área de trituración; b) área de molienda, c) área de tanques de lavado y d) área de separación.

4.1.1 Acarreo del residuo

El residuo actualmente está almacenado a la intemperie en un gran depósito en las instalaciones de la planta. Debido al tiempo que ha permanecido almacenado el residuo y a las condiciones climatológicas, éste se ha compactado y endurecido, por lo que antes de que entre al proceso será necesario fragmentarlo para alcanzar una granulometría adecuada. El proceso se inicia con el arranque del residuo del depósito, utilizando un tractor de orugas. Una vez que el tractor fragmente el residuo, éste se llevará con un cargador hasta una tolva de recepción construida con concreto y que tendrá una capacidad de 14 Ton.

4.1.2 Trituración y molienda

En la tolva de recepción se contará con una parrilla de rieles para detener el material, en caso de existir, que tenga un tamaño mayor a 6 in; este material se quebrará manualmente con el uso de marros.

Dentro de la tolva el material caerá sobre un transportador de cadena con empujadores que lo llevará a dos quebradoras de martillos con capacidad de 7 T/hr cada una; aquí se reducirá el tamaño del material hasta ¼ in.

De las quebradoras el material caerá a una banda y después a un elevador de cangilones que lo llevará hasta una criba vibratoria donde se separará el material menor a ¼ in; este material fino caerá a un silo de almacenamiento con capacidad de 100 ton. El material grueso que no cuente con el tamaño menor a ¼ in se recirculará a la etapa de trituración.

Del silo, por medio de una banda pesadora, el material se alimentará a un molino de bolas con capacidad de 10 T/hr. La molienda será en húmedo y por cada tonelada del material se agregarán 2 toneladas de agua; esto formará una pulpa cuya relación sólido-líquido será de 1:2. La pulpa que descargue el molino, caerá en un cárcamo (5 m³) de donde se bombeará hasta el ciclón para su clasificación. En el ciclón se separará el material fino con tamaño menor a 66µm (malla -150), el cual se enviará a la etapa de lavado; mientras que los gruesos (tamaño mayor a 66µm) regresarán al molino de bolas.

4.1.3 Lavado del residuo

En esta etapa se recuperará el cromo hexavalente contenido en la matriz de aluminio.

La pulpa que procede del ciclón se almacenará en un tanque con agitación de 12 m³ de capacidad. A partir de éste la pulpa se distribuirá a dos tanques agitados de 14 m³ cada uno donde se llevará a cabo la desorción con agua y carbonatos. La planta contará con cuatro tanques en operación.

La desorción se logra con adición de agua en dos los tanques hasta alcanzar una relación residuo-agua de 1:5, para posteriormente dejar sedimentar la pulpa durante 1 ½ hrs. y retirar el extracto mediante bombeo. El extracto recuperado se envía a un proceso de reciclaje de cromo.

A los lodos contenidos en los tanques se adiciona una solución de carbonatos de sodio grado industrial 0.1M hasta alcanzar una relación residuo-solución acuosa de 1:5.

La pulpa se bombea hasta un filtro rotatorio, en el cual se recupera la fase acuosa con un alto contenido en cromo hexavalente disuelto.

Las características físico-químicas del extracto recuperado permiten el reuso de cromo hexavalente para los procesos de la empresa Química Central.

4.1.4 Capacidad estimada

En el caso de este proyecto, la capacidad de tratamiento es de 20 toneladas de residuo por día.

4.1.5 Selección del sitio

Se toman en consideración dos criterios para elegir el sitio; el primero, que la planta se ubique cerca del lugar donde esta almacenado el residuo con el propósito de evitar su transporte y la posible afectación de otros sitios; y el segundo, aprovechar la infraestructura y parte de la tecnología que Química Central de México ya tiene instalada en su planta productiva. Por lo que la planta de recuperación se construirá en el campo de fútbol de la empresa (Diagrama de distribución de planta).

4.1.6 Diagramas de proceso

En todo proceso existen variables y condiciones de operación que deberán permanecer constantes para garantizar la calidad de los productos y mantener la operación dentro de los límites de seguridad necesarios para mantener los equipos además de proteger de algún tipo de riesgo a los operadores.

El Diagrama de Flujo del Proceso (DFP), el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) y el Diagrama de Distribución de la Planta (layout), representan gráficamente la secuencia de los equipos, tuberías, accesorios e instrumentos que permitan la operación de un proceso dentro de ciertas condiciones.

Los diagramas del proceso se encuentran al final de este capítulo.

4.2 Filosofía básica de operación

Para garantizar el tratamiento de 20 toneladas diarias del residuo se definen los tiempos de cada etapa del proceso de la siguiente manera.

El molino de bolas opera a 10 T/hr base húmeda, en una relación residuo: agua de 1:2, la molienda deberá garantizar un residuo cuya partícula sea menor a $66\mu\text{m}$ (malla 150). La pulpa resultante se almacenará en el tanque TP-01 cuya función será como un tanque de balance, la pulpa se bombeará a los tanques TA-01 y TA-02 en un periodo de tiempo de 15 minutos, al mismo tiempo agua alimentará los tanques de agitación, hasta que la relación residuo:agua sea de 1:5, una vez concluida esta etapa, se agitan los tanques a 250rpm durante 1 ½ horas.

Transcurrido el tiempo de agitación, se dejan sedimentar los lodos durante 1 hora, de los cuales se separará la fase acuosa que contiene la mayor parte del Cr (VI) disuelto. Este extracto es enviado al proceso de reciclaje de cromo de la planta, el flujo deberá garantizar el desalojo del extracto en 15 minutos.

El mismo volumen de extracto desalojado se adicionará de una solución 0.1 M de CO_3^{2-} y se agitará nuevamente la mezcla durante 1 ½ horas.

Transcurrido el tiempo de agitación, se envían los lodos a un espesador. La fase acuosa recuperada se envía al proceso de reciclaje de cromo mientras que los lodos resultantes con una baja concentración de Cr (VI) son enviados al proceso de recuperación de aluminio.

4.2.1 Secuencia de operaciones

1. Trasladar 20 toneladas del residuo sin moler.
2. Tomar un lote de 5 toneladas y moler hasta 150 mesh
3. Tomar una muestra de residuo y determinar su contenido en cromo hexavalente
4. Trasladar el residuo molido hasta el tanque de pulpa
5. Trasladar la pulpa a los tanques de agitación
6. Agregar agua a los tanques de agitación hasta tener una relación residuo:agua de 1:5
7. Agitar el contenido de los tanques a 250 rpm durante 1 ½ horas
8. Dejar sedimentar la pulpa durante 1 hora
9. Desalojar la parte clarificada al reproceso de cromo hexavalente (determinar la concentración de Cr(VI), conductividad eléctrica y pH)
10. Adicionar la solución de carbonatos
11. Agitar los tanques durante 1 ½ horas
12. Trasladar la pulpa resultante hasta el espesador
13. Dejar sedimentar durante 2 horas
14. Desalojar los lodos generados y trasladarlos al proceso de recuperación de aluminio (determinar la concentración de Cr(VI), conductividad eléctrica y pH)
15. Desalojar la parte clarificada a reproceso de cromo hexavalente (determinar la concentración de Cr(VI), conductividad eléctrica y pH)
16. Limpieza de los equipos

Cuadro 4.1 Definición de los tiempos en las etapas del proceso de recuperación de Cr(VI)r	
Tarea	Tiempo, minutos
Llenado De Pulpa	15
Llenado De Agua	
Agitación	60
Sedimentación Parcial	90
Desalojo Extracto	15
Llenado Con Solución De CO_3^{2-}	15
Agitación	60
Desalojo Final De La Pulpa	15
Limpieza de los tanques de agitación	30
Sedimentación	120
Desalojo De Extracto	15
Desalojo De Lodos	
Total horas	7.25

Con la finalidad de tratar la mayor cantidad de residuo en un día, se propone empezar el tratamiento de un segundo lote de residuo cuando el primero aún esta en proceso.

La etapa de filtración determina los tiempos mínimos en que se podrán tratar un residuo y otro, de tal manera de que cuando la torta y el extracto del primer residuo salgan del proceso, una nueva carga de lodos se alimente al espesador

Por lo tanto, la pulpa del segundo residuo se alimentará a los tanques de agitación TA-03 y TA-04 cuando falten 15 minutos para concluir la sedimentación parcial de la pulpa del primer residuo.

Dando espacio de ½ hora para la limpieza de los tanques de agitación entre un tratamiento y otro. De esta manera se garantiza el tratamiento de 4 lotes de residuo de 5 toneladas por día.

Cuadro 4.2 Materias primas e insumos		
Materias primas e insumos	Cantidad (T/día)	Etapa del proceso
Residuo de cromo (VI)	20	Trituración
Agua	180	Molienda y lavado
Carbonato de sodio	0.850	Lavado

4.3 Diseño del equipo de proceso

4.3.1 Molienda

El equipo de molienda propuesto para el proceso, es el existente en las instalaciones de la empresa Química Central, por lo que sólo se hace una descripción de ellos en el anexo A.

4.3.2 Tuberías

El diseño de las tuberías dependerá de la función específica que se tenga. Así, el diseño para flujo a dos fases (sólido-líquido) será diferente al diseño para tuberías de agua. También es importante analizar el tipo de material recomendado para evitar la corrosión de las tuberías e n la tabla 4.3 se resumen los materiales de construcción probables para este proceso.

Para tubería de acero

Cuadro 4.3 Esfuerzos permisibles en tensión para materiales. especificaciones ASTM

Material	Especificación	Resistencia a la tensión (Kip/in ²)
18 Cr, 8 Ni	A304	75.0
25 Cr, 20 Ni	A304	75.0
16 Cr, 12 Ni, 2 Mo	A304	70.0
18 Cr, 10 Ni, Cb	A304	75.0

La forma de calcular el diámetro de las tuberías requeridas es fijando un flujo y una velocidad recomendada (R.H. Warring, "Selección de bombas sistemas y aplicaciones", pp 27-45) y aplicando la siguiente ecuación:

$$D^2 = \frac{4 * Q}{\pi * V_s} \dots\dots\dots (4.1)$$

de donde

D: diámetro de la tubería

Q: flujo volumétrico

Vs: velocidad del fluido

La velocidad para fluidos diferentes al agua se determina con la siguiente relación (R.H. Warring, up sit):

$$\rho_{H_2O} / \rho_{fluido} = X \dots\dots\dots (4.2)$$

$$V_{fluido} = V_{H_2O} / X \dots\dots\dots (4.3)$$

de donde

ρ_{H_2O} : densidad del agua a temperatura ambiente

ρ_{fluido} : densidad del fluido a la temperatura de operación

V_{H_2O} : velocidad recomendada para agua (6-7 ft/seg)

V_{fluido} : velocidad del fluido (ft/seg)

X : relación de velocidades

Una vez calculado el diámetro con la ecuación 4.1, se elige el diámetro comercial más cercano al obtenido teóricamente y se recalcula la velocidad del fluido.

4.3.2.1 Tubería de descarga de pulpa a los tanques de agitación

Esta tubería va del tanque de pulpa TP-01 a los tanques de agitación TA-01 al TA-04.

Los datos de la pulpa son: $\rho = 1.4 \text{ g/ml} = 62.3 \text{ lb/ft}^3$ y $\mu = 3 \text{ cp}$.

En esta tubería se tiene flujo a dos fases, sólido-líquido. Para este caso los cálculos se basaron en que la velocidad del flujo en la tubería deberá ser por lo menos 4 o 5 veces más que la velocidad de sedimentación de los lodos.

La velocidad de sedimentación se puede hallar con los datos de la tabla 4.4, por medio de la siguiente definición :

$$V = - \frac{dZ}{dt} \dots\dots\dots (4.4)$$

donde:

V: velocidad de sedimentación

Z: altura de la interfase al tiempo t

t: tiempo

Integrando esta ecuación se obtiene:

$$Z = Z_0 - Vt \dots\dots\dots (4.5)$$

θ , minutos	z_i , cm
2.50	3.50
5.00	3.50
7.50	3.39
10.00	3.30
15.00	3.15
20.00	3.00
25.00	2.10
30.00	2.60

Para el diseño de la tubería, consideraremos el promedio de velocidades, hasta la velocidad crítica de sedimentación (Alan Faust et. Al. "Principios de operaciones unitarias", parte III).

Para $Z_o = 3.15$ cm, le corresponde 15 min.

$$V_{\text{prom}} = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ ft/seg}$$

La velocidad mínima del fluido debe ser 4 o 5 veces más que la velocidad promedio de sedimentación, por lo que debe ser por lo menos de $1.3 \cdot 10^{-2}$ ft/seg.

Como esta velocidad es muy pequeña, la sedimentación no limita el flujo de la pulpa.

La velocidad propuesta es calculada con el siguiente criterio:

$$\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{PULPA}} = \frac{1.0}{1.4} = 0.712$$

$$V_{PULPA} = \frac{6 \text{ ft/seg}}{0.712} = 8.42 \text{ ft/seg}$$

Flujo requerido para llenado de los tanques de agitación en 15 minutos

(5 toneladas residuo + 15 toneladas H₂O) = 20 toneladas pulpa

$$20T_{pulpa} * \frac{1m^3}{1.4T_{pulpa}} * \frac{1}{15 \text{ minutos}} = 0.95m^3 \cdot \frac{1}{\text{minuto}} = 0.56 \frac{ft^3}{seg}$$

$$D = \frac{4 * 0.56 \frac{ft^3}{seg}}{\pi * 8.42 \frac{ft}{seg}} = 0.29 \text{ ft} = 3.5 \text{ in}$$

Para efectos prácticos tomamos el diámetro de 4in

$$V = \frac{4 * 0.48 \frac{ft^3}{seg}}{\pi * (0.29)^2 \text{ ft}^2} = 7.3 \frac{ft}{seg}$$

4.3.2.2 Tubería de desalojo de extracto

Esta tubería va de los tanques TA-01, TA-02, TA-03 y TA-04 al proceso de reciclaje de cromo.

Los datos de la pulpa son: $\rho = 1.1 \text{ g/ml} = 68.61 \text{ lb/ft}^3$ y $\mu = 3\text{cp}$.

$$\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{PULPA}} = \frac{1.0}{1.1} = 0.91$$

$$V_{PULPA} = \frac{6 \frac{ft}{seg}}{0.91} = 6.6 \frac{ft}{seg}$$

Flujo requerido para desalojo del extracto de los tanques de agitación en 15 minutos

Para la relación final residuo:agua de 1:5, y considerando que se tratan lotes de 2.5 toneladas por corrida en cada tanque, con un desalojo del 80% del agua adicionada:

$$0.8 * 12.5 \text{ toneladas H}_2\text{O} = 10 \text{ toneladas extracto}$$

$$10 \text{ Textracto} * \frac{1 \text{ m}^3}{1.1 \text{ Textracto}} * \frac{1}{15 \text{ minutos}} = 0.61 \text{ m}^3 / \text{minuto} = 0.36 \text{ ft}^3 / \text{seg}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.36 \text{ ft}^3 / \text{seg}}{\pi * 6.6 \text{ ft} / \text{seg}}} = 0.26 \text{ ft} = 3.15 \text{ in}$$

Para efectos prácticos tomamos el diámetro de 4in

$$V = \frac{4 * 0.663 \text{ ft}^3 / \text{seg}}{\pi * (0.26)^2 \text{ ft}^2} = 12.5 \text{ ft} / \text{seg}$$

4.3.2.3 Tubería de desalojo de pulpa al espesador

Esta tubería va del fondo de los tanques TA-01 y TA-02 al espesador.

En esta tubería se tiene flujo a dos fases, sólido-líquido. Para este caso los cálculos se basaron en el mismo criterio para el llenado de la pulpa esto es, que la velocidad de desalojo de la pulpa deberá ser por lo menos 4 o 5 veces más que la velocidad de sedimentación de los lodos.

Los datos de la pulpa son: $\rho = 1.3 \text{ g/ml} = 81.1 \text{ lb/ft}^3$ y $\mu = 13 \text{ cp}$.

Dado que la velocidad de sedimentación es muy pequeña comparándola con la velocidad de desalojo del extracto, la sedimentación no limita el flujo de descarga al espesador.

La velocidad propuesta es calculada con el siguiente criterio:

$$\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{PULPA}} = \frac{1.0}{1.3} = 0.77$$

$$V_{PULPA} = \frac{6 \text{ ft/seg}}{0.77} = 7.8 \text{ ft/seg}$$

Flujo requerido para desalojo de la pulpa de los tanques de agitación en 30 minutos

(2.5 toneladas residuo + 12.5 toneladas H₂O) = 15 toneladas pulpa

$$15 \text{ Textracto} * \frac{1 \text{ m}^3}{1.3 \text{ Textracto}} * \frac{1}{15 \text{ minutos}} = 0.77 \text{ m}^3 / \text{minuto} = 0.45 \text{ ft}^3 / \text{seg}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.45 \text{ ft}^3 / \text{seg}}{\pi * 7.8 \text{ ft/seg}}} = 0.30 \text{ ft} = 3.55 \text{ in}$$

Para efectos prácticos tomamos el diámetro de 4 in

$$V = \frac{4 * 0.96 \text{ ft}^3 / \text{seg}}{\pi * (0.30)^2 \text{ ft}^2} = 13.58 \text{ ft/seg}$$

4.3.2.4 Tubería de alimentación de carbonatos

Esta tubería va del tanque TC-01 que contiene una solución de carbonatos a los tanques TA-01, TA-02, TA-03 y TA-04.

Los datos de la solución de carbonatos son: $\rho = 1.0 \text{ g/ml} = 62.37 \text{ lb/ft}^3$ y $\mu = 1 \text{ cp}$.

$$V_{PULPA} = 6.0 \text{ ft/seg}$$

Flujo requerido para llenado de solución de carbonato a los tanques de agitación en 15 minutos.

Si se desalojan 10 toneladas de agua, esa misma cantidad se adiciona de solución de carbonatos.

$$20T_{\text{extracto}} * \frac{1m^3}{1.0T_{\text{extracto}}} * \frac{1}{15 \text{ minutos}} = 1.33m^3/\text{minuto} = 0.78 \text{ ft}^3/\text{seg}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.78 \text{ ft}^3/\text{seg}}{\pi * 6.0 \text{ ft/seg}}} = 0.41 \text{ ft} = 4.9 \text{ in}$$

Para efectos prácticos tomamos el diámetro inmediato superior de 6 in

$$V = \frac{4 * 0.78 \text{ ft}^3/\text{seg}}{\pi * (0.41)^2 \text{ ft}^2} = 5.91 \text{ ft/seg}$$

4.3.2.5 Tubería de desalajo de extracto del espesador

Esta tubería va del espesador a reproceso de cromo hexavalente..

Los datos de la solución de carbonatos son: $\rho = 1.1 \text{ g/ml} = 62.37 \text{ lb/ft}^3$ y $\mu = 3\text{cp}$.

La velocidad propuesta es calculada con el siguiente criterio:

$$\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{PULPA}} = \frac{1.0}{1.1} = 0.9$$

$$V_{PULPA} = \frac{6 \text{ ft/seg}}{0.9} = 5.45 \text{ ft/seg}$$

Flujo requerido para el desalajo del extracto a reproceso en 15 minutos.

Desalojando el 85% de la fase acuosa de la pulpa

$$25 * 0.85 \text{ton_extracto} * \frac{1 \text{m}^3}{1.1 \text{ton_extracto}} * \frac{1}{15 \text{minutos}} = 1.30 \text{m}^3 / \text{minuto} = 0.76 \text{ft}^3 / \text{seg}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.76 \text{ft}^3 / \text{seg}}{\pi * 5.45 \text{ft} / \text{seg}}} = 0.42 \text{ft} = 5.0 \text{in}$$

$$V = \frac{4 * 0.76 \text{ft}^3 / \text{seg}}{\pi * 0.42 \text{ft}^2} = 2.30 \text{ft} / \text{seg}$$

4.3.2.6 Tubería de desalojo de lodos del espesador

Esta tubería va del espesador al proceso de recuperación de aluminio.

Los datos de los lodos son: $\rho = 5.0 \text{ g/ml} = 311.87 \text{ lb/ft}^3$ y $\mu = 20 \text{cp}$.

En esta tubería se tiene flujo a dos fases, sólido-líquido. Para este caso los cálculos se basaron en el mismo criterio para el llenado de la pulpa

Se propone una velocidad de 10 ft/seg

Flujo requerido para desalojo de lodos en 15 minutos

(5 ton residuo + 25 toneladas de H₂O) = 30 Ton pulpa

Considerando el 15% de retención de agua cuando se deja sedimentar la pulpa durante 2 horas.

$$(5 \text{ton_residuo} + 25 \text{ton_agua} * 0.15) * \frac{1 \text{m}^3}{5 \text{ton_lodos}} * \frac{1}{15 \text{minutos}} = 0.12 \text{m}^3 / \text{minuto} = 0.069 \text{ft}^3 / \text{seg}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.07 \text{ft}^3 / \text{seg}}{\pi * 10 \text{ft} / \text{seg}}} = 0.094 \text{ft} = 1.14 \text{in}$$

Para efectos prácticos tomamos el diámetro de 1.25 in

4.3.4 Bombas

El diseño de las bombas se hizo por medio de un cálculo descrito en el Manual Perry del Ingeniero Químico (sección 5 tomo 1), el cual involucra los siguientes conceptos:

Si queremos mover un líquido debemos efectuar un trabajo, el cual será la potencia desarrollada de la bomba, que es el producto de la carga dinámica total y la masa de líquido bombeado en un tiempo dado. Mediante un balance de energía:

$$\Delta \left(\frac{V^2}{2gc} \right) + \Delta Z \frac{g}{gc} + \int_{P_1}^{P_2} V dP + \Sigma F = -W \quad (4.6)$$

$$hP = \Sigma F * V * S * \rho * \frac{1hp}{550} * \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (4.7)$$

Para un flujo isotérmico e incompresible $V_1=V_2$ y $P_1=P_2$

$$\Delta Z \frac{g}{gc} + \Sigma F = -W \quad (4.8)$$

de donde ΣF lo definimos como

$$\Sigma F = \frac{fV^2(\Sigma L)}{2gcD} \quad (4.9)$$

$$f = \left(\frac{2gc\Sigma F}{V^2} \right) * \left(\frac{D}{\Sigma L} \right) = \phi \left[\left(N_{Re} \right) \left(\frac{\epsilon}{D} \right) \right] \quad (4.10)$$

de donde

ΣF : pérdida total por fricción [ft-lbf / lb]

f: factor de fricción

D: diámetro de los tubos [ft]

V: velocidad promedio [ft / seg]

ΣL : longitud equivalente de accesorios y tramos rectos [ft]

(ϵ/D) : factor de rugosidad relativa

η : eficiencia de la bomba

Al escoger bombas para cualquier servicio, es necesario saber que líquido se va a manejar, cuál es la carga dinámica total, las cargas de succión y descarga y, en la mayor parte de los casos, la temperatura, la viscosidad, la presión de vapor y la densidad relativa.

Los tipos más comunes de bombas son las centrífugas y las de desplazamiento positivo.

Las bombas centrífugas son más sencillas y baratas es el tipo que más se utiliza en la industria química. Estas bombas están disponibles en una variedad amplia de tamaños, en capacidades de 0.5 m³/h a 2*10⁴ m³/h, y para descargas desde unos cuantos metros a aproximadamente 48 Mpa.

Las ventajas de este tipo de bombas son la sencillez, el bajo costo inicial, el flujo uniforme, el pequeño espacio requerido para su instalación, los bajos costos de mantenimiento, el funcionamiento silencioso y su capacidad de adaptación para su empleo con unidad motriz de motor eléctrico o de turbina.

Las bombas de desplazamiento positivo trabajan con líquidos viscosos o pesados, desarrollan altas presiones y dan un caudal casi libre de fluctuaciones e independiente de la presión de descarga.

En el presente trabajo se escogido trabajar con bombas centrífugas por los motivos antes mencionados.

4.3.4.1 Bomba para la alimentación de pulpa (BO-01)

De la sección anterior se obtuvieron los siguientes datos:

$$D_{\text{succión}} = 4 \text{ in (para acero ANSI B36.10-1975)}$$

$$D_{\text{int}} = 4.026 \text{ in} = 10.23 \text{ cm}$$

$$V_s = 222.50 \text{ cm/seg}$$

$$\mu = 3 \text{ cp} = 0.01 \text{ g/cm}^2\text{seg}$$

$$N_{Re} = \frac{D * V_s * \rho}{\mu} = \frac{10.23 \text{ cm} * 222.50 \text{ cm/seg} * 1.4 \text{ g/cm}^3}{0.03 \frac{\text{g}}{\text{cmseg}}} = 106,221$$

De las tablas de longitudes equivalentes L y L/D y los coeficientes de resistencia K obtenidos del Manual de Flujo de Fluidos Crane (apéndice A, pp 48-50). Para tubería de acero inoxidable cédula 40:

Cuadro 4.5 Longitudes requeridas para implementación de tuberías para alimentación de la pulpa

Cantidad	Descripción	K	L/D	L (ft)
	Tramo recto			93
1	Entrada del recipiente al tubo	0.23		25
5	Codos 90°		30	50.33
6	Válvulas de compuerta para pulpas totalmente abiertas		17	34.22
1	T convencional		20	6.71
1	T convencional ramificada		60	20.13
1	Válvula check			25
Total				254.4

$$\epsilon/D = 0.00045 \text{ (Manual de Flujo de Fluidos, capítulo 3, pp 13)}$$

$$f = 0.0115$$

$$\Sigma F = \frac{0.0115 * (7.3 \text{ ft} / \text{seg})^2 * 254.4 \text{ ft}}{2 * 32.2 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lb} \cdot \text{seg}^2} * 0.34 \text{ ft}} = 7.120 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lb}}$$

del balance de energía

$$-W = \left[(19.7 - 0) \text{ ft} * \left(\frac{32.2 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}}{32.2 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{lb} \cdot \text{seg}^2}} \right) \right] + 7.12 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lb}} = 26.82 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lb}}$$

La bomba suministra una carga de 26.82 ft.

$$\text{Área transversal } S = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.336^2 \text{ ft}^2}{4} = 0.089 \text{ ft}^2$$

$$hp = \left(26.82 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lb}} \right) * \left(8.42 \frac{\text{ft}}{\text{seg}} * 0.089 \text{ ft}^2 \right) * \left(87.32 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ hp}}{550 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{seg}}} \right) * \left(\frac{1}{0.60} \right)$$

$$\text{potencia} = 5.32 \text{ hp}$$

4.3.4.2 Bomba para la alimentación de carbonatos (BO-02)

De la sección anterior se obtuvieron los siguientes datos:

$$D_{\text{succión}} = 6 \text{ in (para acero ANSI B36.10-1975)}$$

$$D_{\text{int}} = 6 \text{ in}$$

$$V_s = 5.91 \text{ ft/seg}$$

$$\mu = 1 \text{ cp} = 0.01 \text{ g/cm seg}$$

$$N_{\text{Re}} = \frac{D * V_s * \rho}{\mu} = \frac{13.58 \text{ cm} * 180.14 \text{ cm/seg} * 1.0 \text{ g/cm}^3}{0.01 \frac{\text{g}}{\text{cmseg}}} = 244,630$$

De las tablas de longitudes equivalentes L y L/D y los coeficientes de resistencia K del Manual Crane (apéndice A, pp 48-50). Para tubería de acero inoxidable cédula 40:

Cuadro 4.5 Longitudes requeridas para implementación de tuberías para alimentación de la pulpa				
Cantidad	Descripción	K	L/D	L (ft)
	Tramo recto			93
1	Entrada del recipiente al tubo	0.23		25
5	Codos 90°		30	50.33
6	Válvulas de compuerta para pulpas totalmente abiertas		17	34.22
1	T convencional		20	6.71
1	T convencional ramificada		60	20.13
1	Válvula check			25
Total				254.4

Para la tubería de 6 in

$\epsilon/D = 0.00045$ (Manual de Flujo de Fluidos, capítulo 3, pp 13)

$f = 0.011$

$$\Sigma F = \frac{0.011 * (5.91 \text{ ft/seg})^2 * 254.4 \text{ ft}}{2 * 32.2 \frac{\text{lb}}{\text{lbseg}^2} * 0.5 \text{ ft}} = 3.03 \text{ ft} - \frac{\text{lb}}{\text{lb}}$$

$$-W = \left[(19.7 - 0) \text{ ft} * \left(\frac{32.2 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}}{32.2 \frac{\text{ft} - \text{lb}}{\text{lbseg}^2}} \right) \right] + (3.03) \text{ ft} - \frac{\text{lb}}{\text{lb}} = 22.73 \text{ ft} - \frac{\text{lb}}{\text{lb}}$$

La bomba suministra una carga de 22.7 ft.

$$\text{Área transversal } S = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.5 \text{ ft})^2}{4} = 0.196 \text{ ft}^2$$

$$hp = \left(22.7 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{lb}} \right) * \left(8.42 \frac{\text{ft}}{\text{seg}} * 0.196 \text{ ft}^2 \right) * \left(87.32 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ hp}}{550 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{seg}}} \right) * \left(\frac{1}{0.60} \right)$$

potencia = 10 hp

4.3.4.3 Bomba para desalojo de extracto (BO-03)

De la sección anterior se obtuvieron los siguientes datos:

$D_{\text{succión}} = 4 \text{ in}$ (para acero ANSI B36.10-1975)

$D_{\text{int}} = 4.026 \text{ in} = 10.23 \text{ cm}$

$V_s = 12.5 \text{ ft/seg}$

$\mu = 3 \text{ cp} = 0.01 \text{ g/cm seg}$

$$N_{\text{Re}} = \frac{D * V_s * \rho}{\mu} = \frac{10.23 \text{ cm} * 381 \text{ cm/seg} * 1.1 \text{ g/cm}^3}{0.03 \frac{\text{g}}{\text{cmseg}}} = 142,913$$

De las tablas de longitudes equivalentes L y L/D y los coeficientes de resistencia K del Manual Crane (apéndice A, pp 48-50), para tubería de acero inoxidable cédula 40:

Cantidad	Descripción	K	L/D	L (ft)
	Tramo recto			96.6
2	Entrada del recipiente al tubo	0.23		50
4	Codos 90°		30	139.6
3	Válvulas de compuerta totalmente abiertas		13	14.0
1	T convencional		20	6.71
1	T convencional ramificada		60	20.13
1	Válvula check			25
Total				352.00

$\varepsilon/D = 0.00045$ (Manual de Flujo de Fluidos, capítulo 3, pp 13)

$f = 0.017$

$$\Sigma F = \frac{0.017 * (12.5 \text{ ft / seg})^2 * 352 \text{ ft}}{2 * 32.2 \frac{\text{lb}}{\text{lbseg}^2} * 0.336 \text{ ft}} = 43.21 \text{ ft} - \text{lb} / \text{lb}$$

del balance de energía

$$-W = \left[(11.81 - 0) \text{ ft} * \left(\frac{32.2 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}}{32.2 \frac{\text{ft} - \text{lb}}{\text{lbseg}^2}} \right) \right] + 43.21 \text{ ft} - \text{lb} / \text{lb} = 55.02 \text{ ft} - \text{lb} / \text{lb}$$

La bomba suministra una carga de 55 ft.

$$\text{Área transversal } S = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.336^2 \text{ ft}^2}{4} = 0.089 \text{ ft}^2$$

$$hp = \left(55.02 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{seg}} \right) * \left(6.51 \frac{\text{ft}}{\text{seg}} * 0.089 \text{ ft}^2 \right) * \left(68.6 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ hp}}{550 \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{seg}}} \right) * \left(\frac{1}{0.60} \right)$$

potencia = 6.6 hp

Las bombas BO-04 y BO-05, quedan indicadas en los diagramas del proceso, no se determinan las potencias debido a que estarán en función de las condiciones de operación del proceso de recuperación de aluminio

Las bombas BO-04 y BO-05, quedan indicadas en los diagramas del proceso, no se determinan las potencias debido a que estarán en función de las condiciones de operación del proceso de recuperación de aluminio

4.3.5 Diseño de los tanques de proceso

La norma ANSI B31.3-1976, asigna los requisitos de diseño y fabricación de tuberías, los cuales también pueden aplicarse a el diseño de tanques de proceso. Los criterios de diseño se muestran a continuación (Robert H. Perry, "Manual del ingeniero químico", sección 23 tomo 2):

Presión de diseño: La presión de diseño no será menor a las condiciones de presión y temperatura para el espesor mayor.

Temperatura de diseño: La temperatura de diseño es la temperatura del material representativa para las condiciones conjuntas más severas de presión y temperatura, la temperatura del metal será considerada como la temperatura del fluido.

De la misma manera, el Código ASME Sección VII, asigna los requisitos de diseño y fabricación de tanques de proceso.

La casi totalidad de los tanques son cilíndricos, debido a la fuerza estructural que esta geometría provee y a la gran capacidad de soportar esfuerzos inherentes al proceso (Constantino Álvarez, "Diseño de tanques de procesos").

- Esfuerzo longitudinal resultantes de la presión interna del tanque
- Esfuerzo circunferencial resultante de la presión interna del tanque
- Esfuerzo residual de soldadura
- Esfuerzos resultantes de cargas adicionales tales como viento, nieve, hielo, equipo auxiliar y cargas de impacto.
- Esfuerzos resultantes de diferencias térmicas.

Los diseños de los tanques de procesos del presente trabajo, están calculados según el Código ASME Sección VII. El siguiente esquema presenta una geometría general para el diseño de tanques de mezcla, el cual que sirve como base de cálculo, pues es sabido que los factores de diseño para tanques agitados varían para cada caso en particular, y resultarían tantas geometrías como equipos y sustancias se manejen.

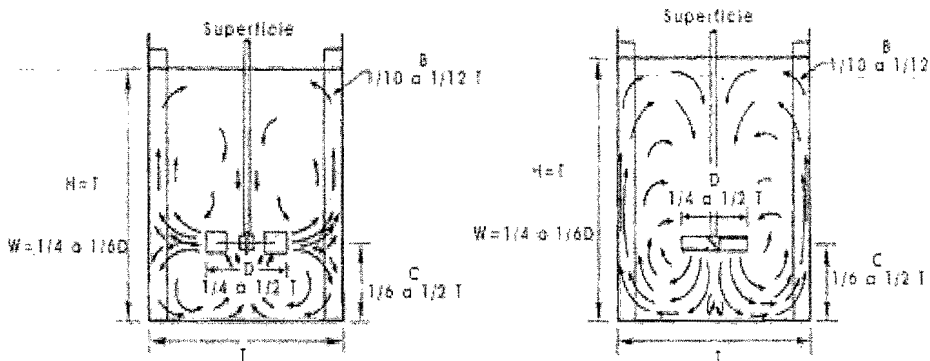


Figura 4.2 Diseño de tanques de procesos.

de donde:

- T : Diámetro de Tanque, m
 H : Altura de Fluido, m
 W : Ancho de Agitador, m
 D : Diámetro del Agitador, m
 B : Desviador de Pared, m
 C : Distancia del Tanque al Agitador, m
 Z : Altura del Tanque, m

Las dimensiones del agitador, desviador de pared y distancias del agitador a las paredes del tanque, se determinan según la figura 4.2

4.3.5.1 Espesor de las paredes

Según el requisito del ASME Boiler and Pressure Vessel Code, el diseño es para una presión de 10% más o menos por encima de la presión de operación máxima esperada, con el fin de evitar fugas. La formula para el espesor mínimo requiere conocimientos tales como las tolerancias dejadas por corrosión y erosión, al igual que a los esfuerzos máximos permisibles de los materiales de construcción.

$$t = \frac{P_{op} D_o}{2 f E} + C \dots\dots\dots (4.11)$$

$$P_{op} = P_{atm} + P_{hid} \dots\dots\dots (4.12)$$

$$P_{hid} = \rho g H \dots\dots\dots (4.13)$$

de donde

t: espesor de la pared del tanque

Do: diámetro interno del tanque

f: esfuerzo permisible para el material de fabricación

E: factor de calidad de grado estructural con valor aproximado de 0.92

C: tolerancia dejadas por la corrosión y erosión con un valor aproximado de 1/8 in

Pop: presión de operación = $P_{atm} + P_{man}$, Pa

Phid: Presión hidrostática, Pa

ρ : densidad del fluido contenido en el tanque

g: aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg^2

H: altura del fluido en el tanque, m

La presión hidrostática en tanques cilíndricos varía de un mínimo en la parte superior de la fila más alta, a un máximo en la parte inferior de la fila más baja. Al determinar el espesor de una fila determinada, el diseño basado en la presión de la parte inferior de la fila resulta un sobre diseño para el resto de la placa, un diseño basado en la parte superior de la fila, resultará un diseño pobre que puede no ser adecuado. Un diseño basado en la presión de un pie de altura de la parte inferior de la fila, puede considerarse un diseño conservador.

El API-650 por motivos de fabricación e instalación, establece los espesores mínimos, incluyendo el sobre espesor por corrosión, dependiendo del diámetro del tanque.

Diámetro del tanque, m	Espesor mínimo, mm (in)
Menor de 15.3	5
de 15.3 a 36.6	6 (3/16)
de 36.6 a 61	8 (1/4)
mayores de 61	10 (3/8)

De los materiales para la construcción de los tanque que se muestran en la tabla 4.5 se seleccionan aquellos que contengan una gran cantidad de Ni y Cr asegurando con esto la resistencia de los materiales a la corrosión, por lo que elegimos el material con la siguiente aleación 25% Cr y 20% Ni (serie A312).

4.3.5.2 Tanques de agitación TA-01 al T-04

$$V_{\text{pulpa}} = (\text{Masa residuo} + \text{Masa de agua}) * \rho_{\text{pulpa}}$$

$$V_{\text{pulpa}} = (2.5 \text{ Toneladas residuo} + 12.5 \text{ Toneladas agua}) * (m^3 / 1.3 \text{ Toneladas pulpa}) = 11.53 \text{ m}^3$$

Se propone un volumen de 14 m³ para considerar volumen ocupado por el agitador.

Se propone un diámetro para el tanque

$$D_{\text{tanque}} = 2.5 \text{ m}$$

$$V_{\text{tanque}} = \frac{1}{4} \pi D^2 H$$

Altura del tanque

$$H = \frac{4 * V_{\text{tanque}}}{\pi * D_{\text{tanque}}^2} = \frac{4 * 14 \text{ m}^3}{\pi * (2.5 \text{ m})^2} = 2.85 \text{ m}$$

Altura de la pulpa

$$H = \frac{4 * V_{\text{pulpa}}}{\pi * D_{\text{pulpa}}^2} = \frac{4 * 11.53 \text{ m}^3}{\pi * (2.5 \text{ m})^2} = 2.35 \text{ m}$$

El espesor se calcula usando la ecuación 4.11

Altura de pulpa: 2.35m

$$\rho = 1.3 \text{ Kg/m}^3$$

$$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm}$$

$$P_{hid} = 1.3 \text{Kg} / \text{m}^3 * 9.81 \text{m} / \text{seg}^2 * 2.35 \text{m} = 30 \text{Pa}$$

$$P_{op} = 101,325 \text{Pa} + 30 \text{Pa} = 101.355 \text{KPa}$$

$$t = \frac{101.355 \text{KPa} * 2.5 \text{m}}{2 * 517,106 \text{KPa} * 0.92} + 0.004 \text{m} = 4.3 * 10^{-3} \text{m} = 0.17 \text{in}$$

Desviadores de la pared B:

$$B = \frac{1}{12} \cdot D = \frac{1}{12} * 2.5 \text{m} = 0.21 \text{m}$$

Distancia del tanque al agitador C:

$$C = \frac{1}{6} D = \frac{1}{6} * 2.5 \text{m} = 0.42 \text{m}$$

Diámetro del agitador d:

$$d = \frac{1}{4} D = \frac{1}{4} * 2.5 \text{m} = 0.62 \text{m}$$

Ancho del agitador W:

$$W = \frac{1}{4} d = \frac{1}{4} * 0.62 \text{m} = 0.15 \text{m}$$

Dimensiones

$$\text{Volumen} = 14 \text{ m}^3$$

$$\text{Diámetro} = 2.5 \text{ m}$$

Altura = 2.85 m

Espesor = 0.17 in

Desviadores = 0.21 m

Distancia del tanque al agitador = 0.42 m

Diámetro del agitador = 0.62 m

Ancho del agitador = 0.15 m

4.3.5.3 Tanque de pulpa TP-01

$$V_{\text{Tanque}} = (\text{Masa residuo} + \text{Masa de agua}) * \rho_{\text{pulpa}}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{Tanque}} &= (5 \text{ Toneladas residuo} + 10 \text{ Toneladas agua}) * (\text{m}^3 / 1.5 \text{ Toneladas pulpa}) \\ &= 10 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Se propone un volumen de 12 m³ para considerar volumen ocupado por el agitador y un margen para agitación.

Se propone un diámetro para el tanque

$$D_{\text{tanque}} = 2.25 \text{ m}$$

$$V_{\text{Tanque}} = \frac{1}{4} \pi D^2 H$$

Altura del tanque

$$H = \frac{4 * V_{\text{Tanque}}}{\pi * D_{\text{Tanque}}^2} = \frac{4 * 12 \text{ m}^3}{\pi * (2.25 \text{ m})^2} = 3.0 \text{ m}$$

Altura de la pulpa

$$H = \frac{4 * V_{\text{Tanque}}}{\pi * D_{\text{Tanque}}^2} = \frac{4 * 10 \text{ m}^3}{\pi * (2.25 \text{ m})^2} = 2.5 \text{ m}$$

Altura de pulpa: 2.5m

$$\rho = 1.5 \text{ Kg/m}^3$$

Patm = 1 atm

$$P_{hid} = 1.5 \text{ Kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/seg}^2 * 2.5 \text{ m} = 36.78 \text{ Pa}$$

$$P_{op} = 101,325 \text{ Pa} + 36.78 \text{ Pa} = 101.361 \text{ KPa}$$

Aplicando la ecuación 4.11

$$t = \frac{101.362 \text{ KPa} * 2.25 \text{ m}}{2 * 517,106 \text{ KPa} * 0.92} + 0.004 \text{ m} = 4 * 10^{-3} \text{ m} = 0.17 \text{ in}$$

Desviadores de la pared B:

$$B = \frac{1}{12} * D = \frac{1}{12} * 2.25 \text{ m} = 0.19 \text{ m}$$

Distancia del tanque al agitador C:

$$C = \frac{1}{6} D = \frac{1}{6} * 2.25 \text{ m} = 0.38 \text{ m}$$

Diámetro del agitador d:

$$d = \frac{1}{4} D = \frac{1}{4} * 2.25 \text{ m} = 0.56 \text{ m}$$

Ancho del agitador W:

$$W = \frac{1}{4}d = \frac{1}{4} * 0.56m = 0.14m$$

Dimensiones

Volumen = 12 m³

Diámetro = 2.25 m

Altura = 3.0 m

Espesor = 0.17 in

Desviadores = 0.19 m

Distancia del tanque al agitador = 0.38 m

Diámetro del agitador = 0.056 m

Ancho del agitador = 0.14 m

4.3.5.4 Tanque de carbonatos TC-01

(25 toneladas agua * 0.8) = 20 ton agua

20 toneladas carbonatos * 1m³/1.0 toneladas carbonatos = 20 m³

Se propone un volumen de 25 m³ para considerar volumen ocupado por el agitador y un margen para la agitación.

Se propone un diámetro para el tanque

D_{tanque} = 3 m

$$V_{Tanque} = \frac{1}{4} \pi D^2 H$$

Altura del tanque

$$H = \frac{4 * V_{Tanque}}{\pi * D_{Tanque}^2} = \frac{4 * 25m^3}{\pi * (2.75m)^2} = 4.2m$$

Altura de la solución de carbonatos

$$H = \frac{4 * V_{Tanque}}{\pi * D_{Tanque}^2} = \frac{4 * 20m^3}{\pi * (2.75m)^2} = 3.37m$$

$$\rho = 1.0 \text{ Kg/m}^3$$

$$P_{atm} = 1 \text{ atm}$$

$$P_{hid} = 1.0 \text{ Kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/seg}^2 * 3.37 \text{ m} = 33.06 \text{ Pa}$$

$$P_{op} = 101,325 \text{ Pa} + 33.06 \text{ Pa} = 101.358 \text{ KPa}$$

Aplicando la ecuación 4.11

$$t = \frac{101.353 \text{ KPa} * 2.75 \text{ m}}{2 * 330,948 \text{ KPa} * 0.92} + 0.004 \text{ m} = 4.5 * 10^{-3} \text{ m} = 0.18 \text{ in}$$

Desviadores de la pared B:

$$B = \frac{1}{12} D = \frac{1}{12} * 2.75 \text{ m} = 0.23 \text{ m}$$

Distancia del tanque al agitador C:

$$C = \frac{1}{6} D = \frac{1}{6} * 2.75 \text{ m} = 0.46 \text{ m}$$

Diámetro del agitador d:

$$d = \frac{1}{4} D = \frac{1}{4} * 2.75 \text{ m} = 0.69 \text{ m}$$

Ancho del agitador W:

$$W = \frac{1}{4} d = \frac{1}{4} * 0.69m = 0.17m$$

Dimensiones

Volumen = 20 m³

Diámetro = 3.0 m

Altura = 3.3 m

Espesor = 0.18 in

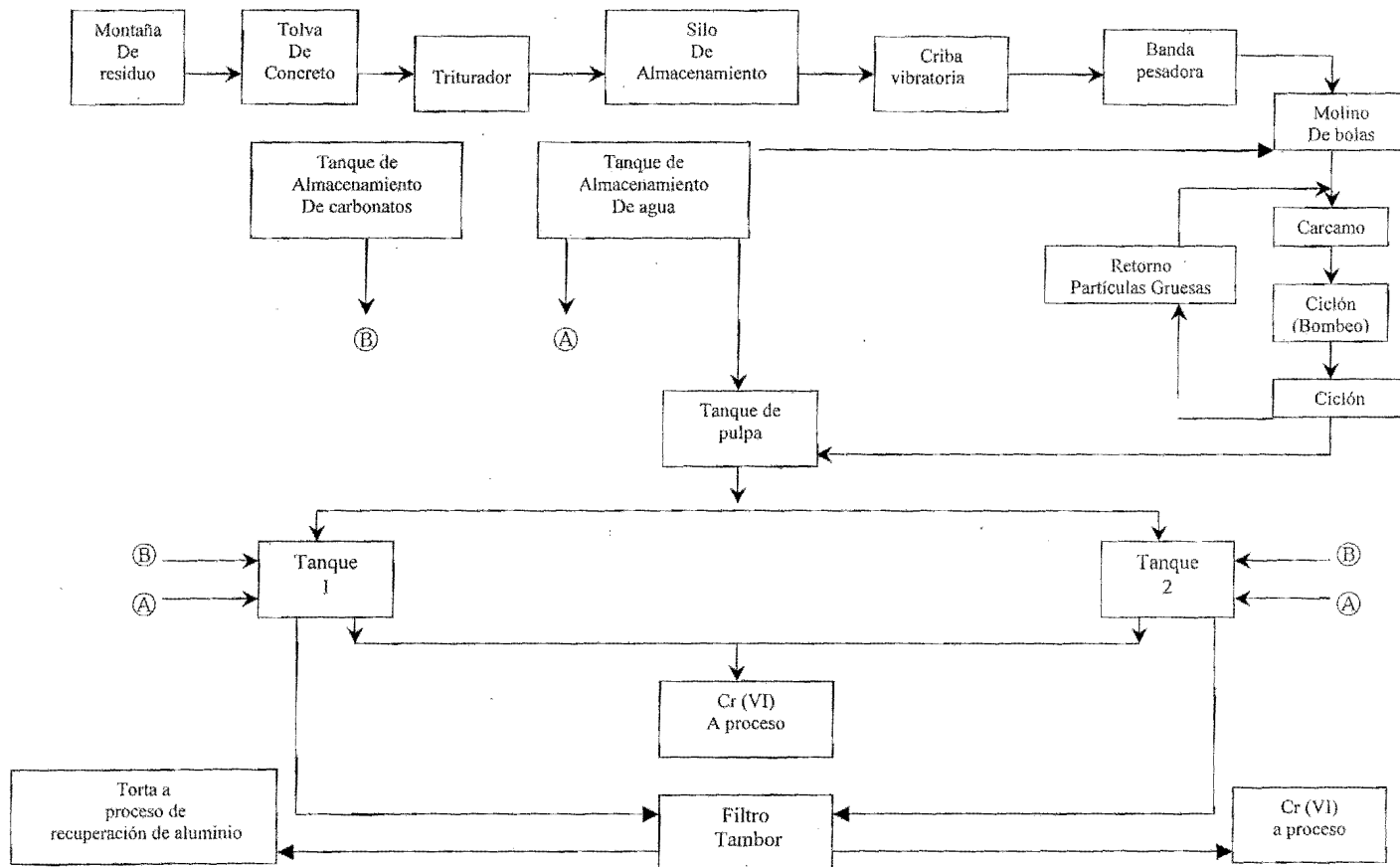
Desviadores = 0.23 m

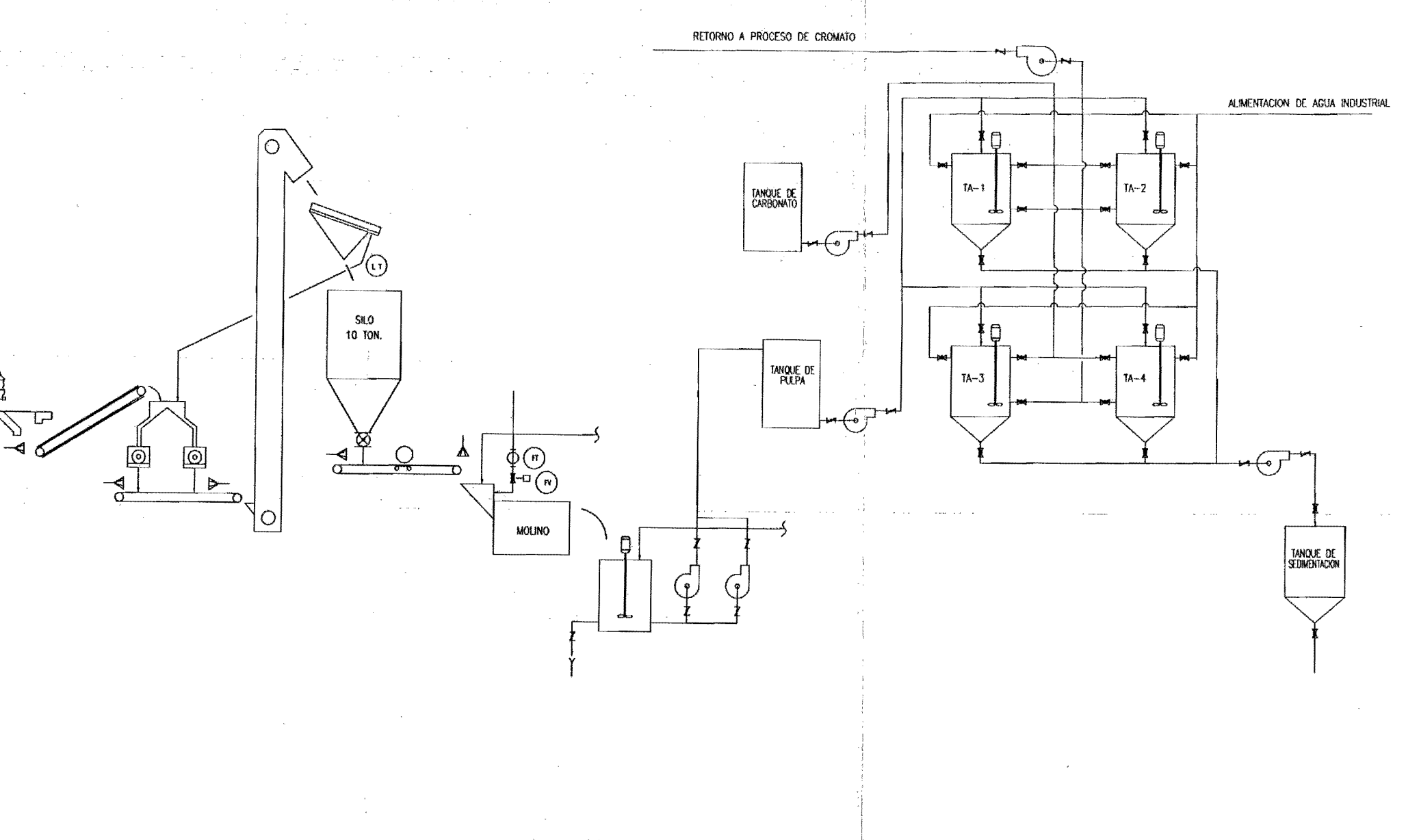
Distancia del tanque al agitador = 0.46 m

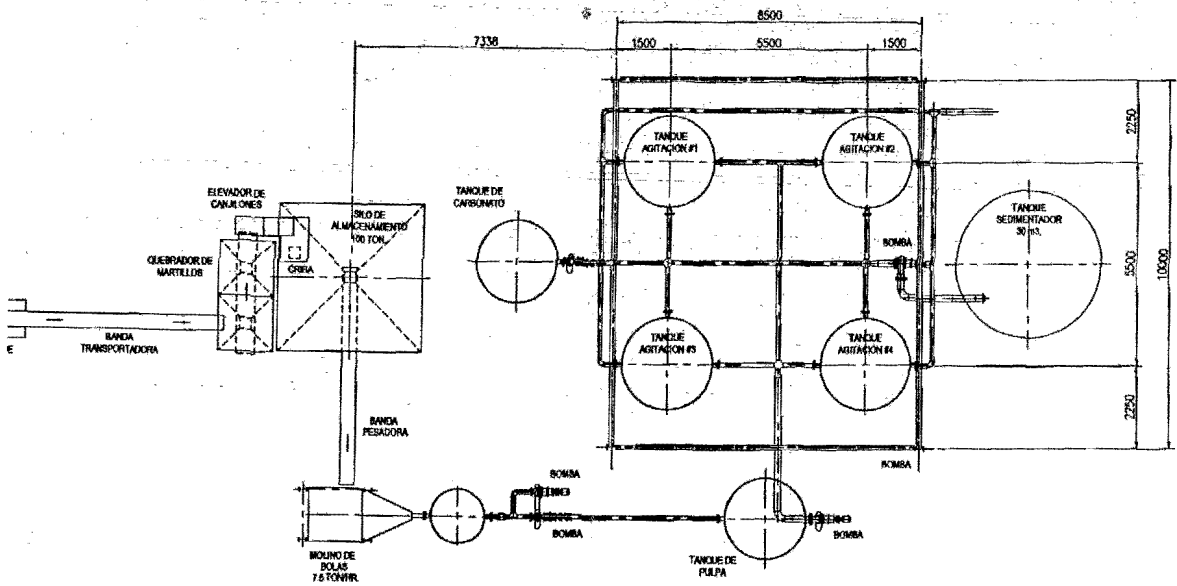
Diámetro del agitador = 0.69 m

Ancho del agitador = 0.17 m

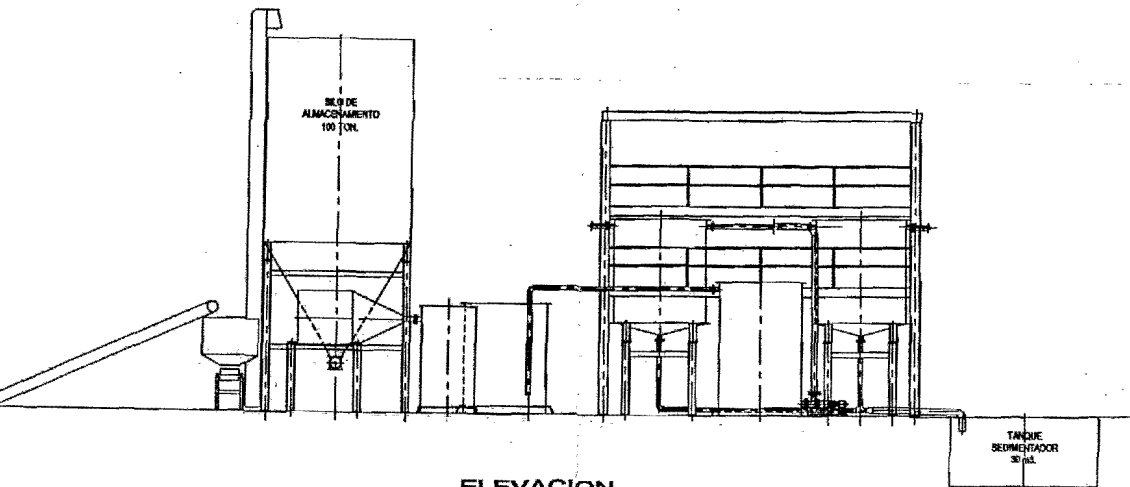
Figura 4.1 Diagrama de bloques del proceso de tratamiento del residuo con cromo hexavalente



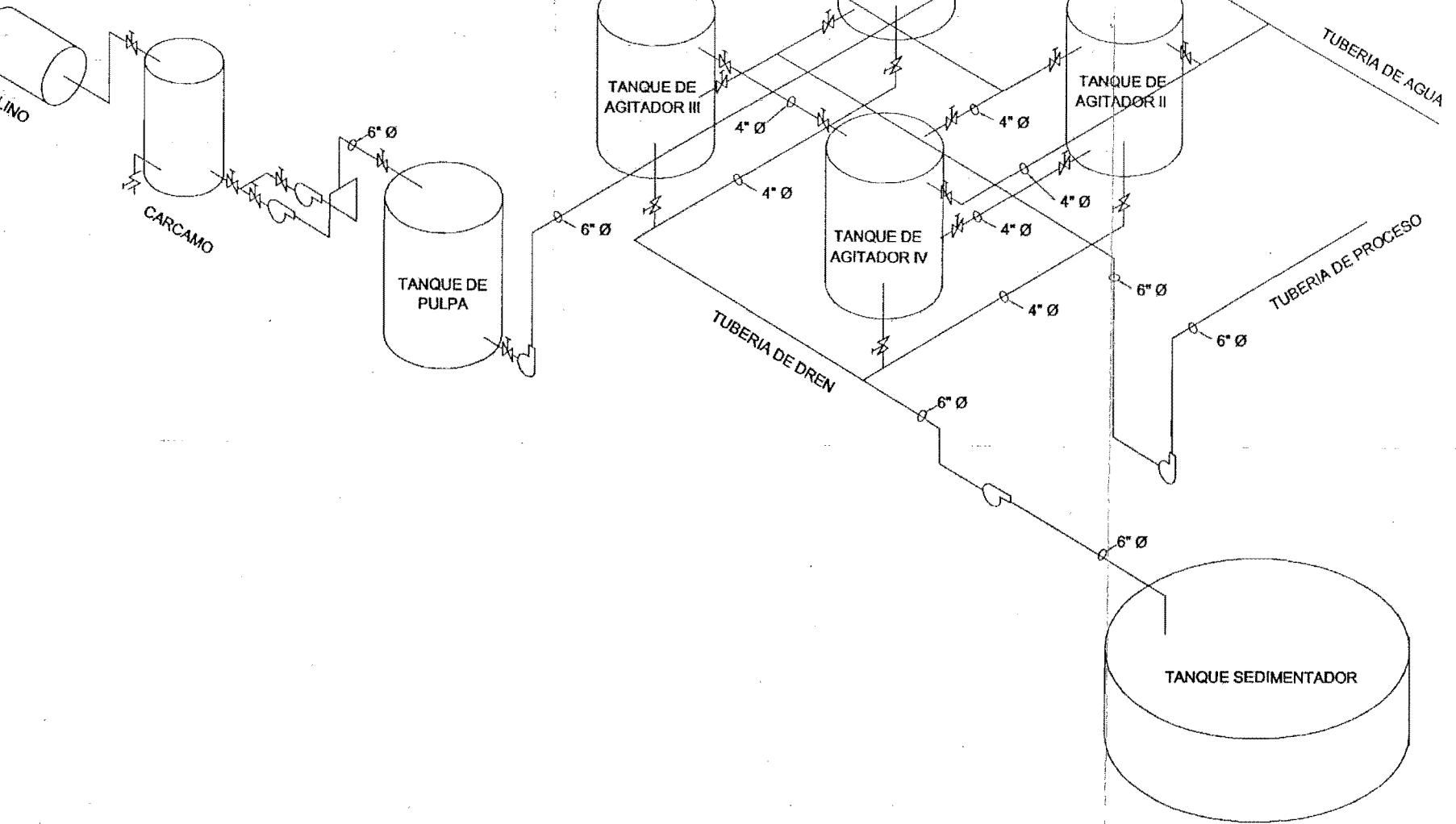




PLANTA



ELEVACION



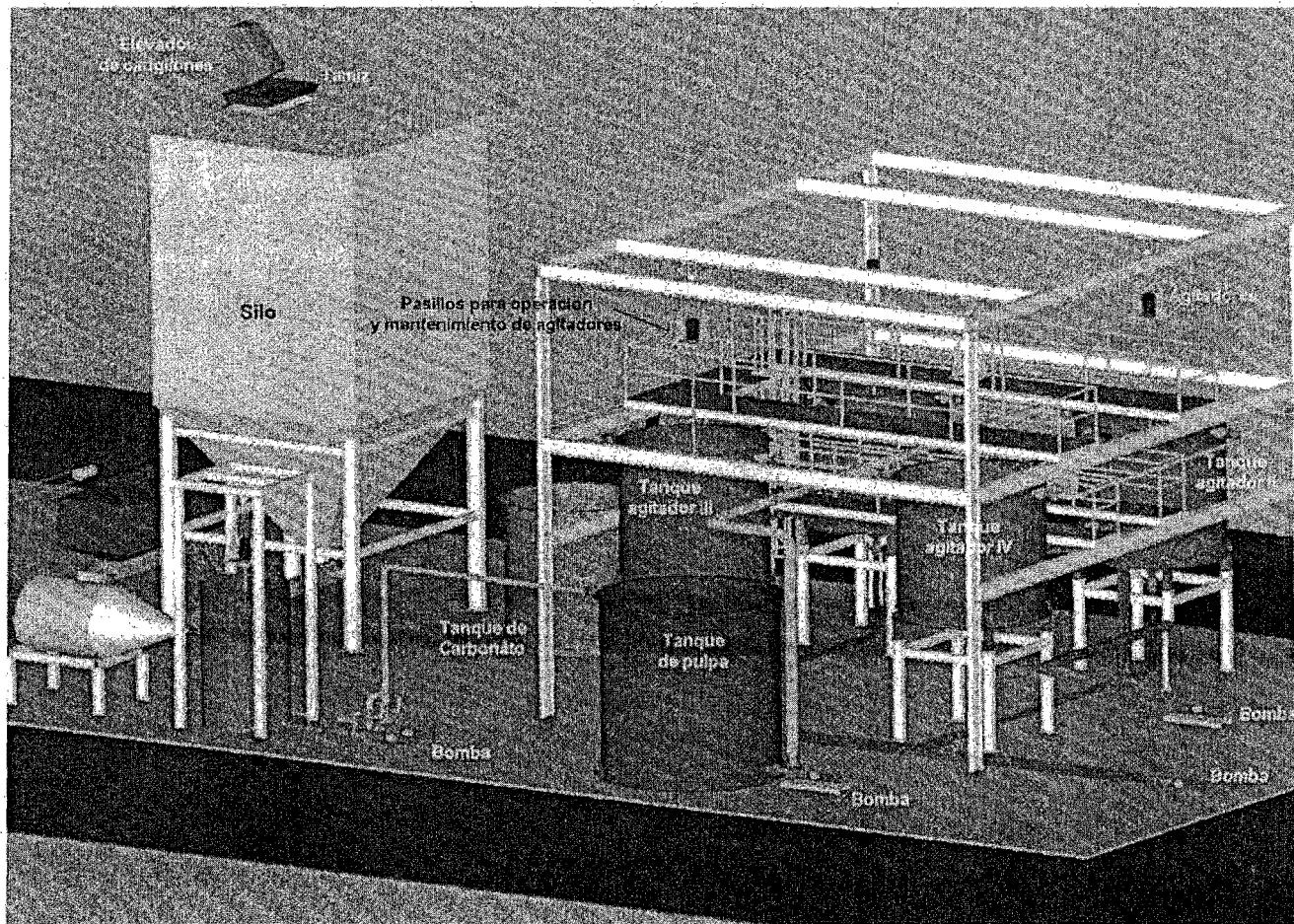
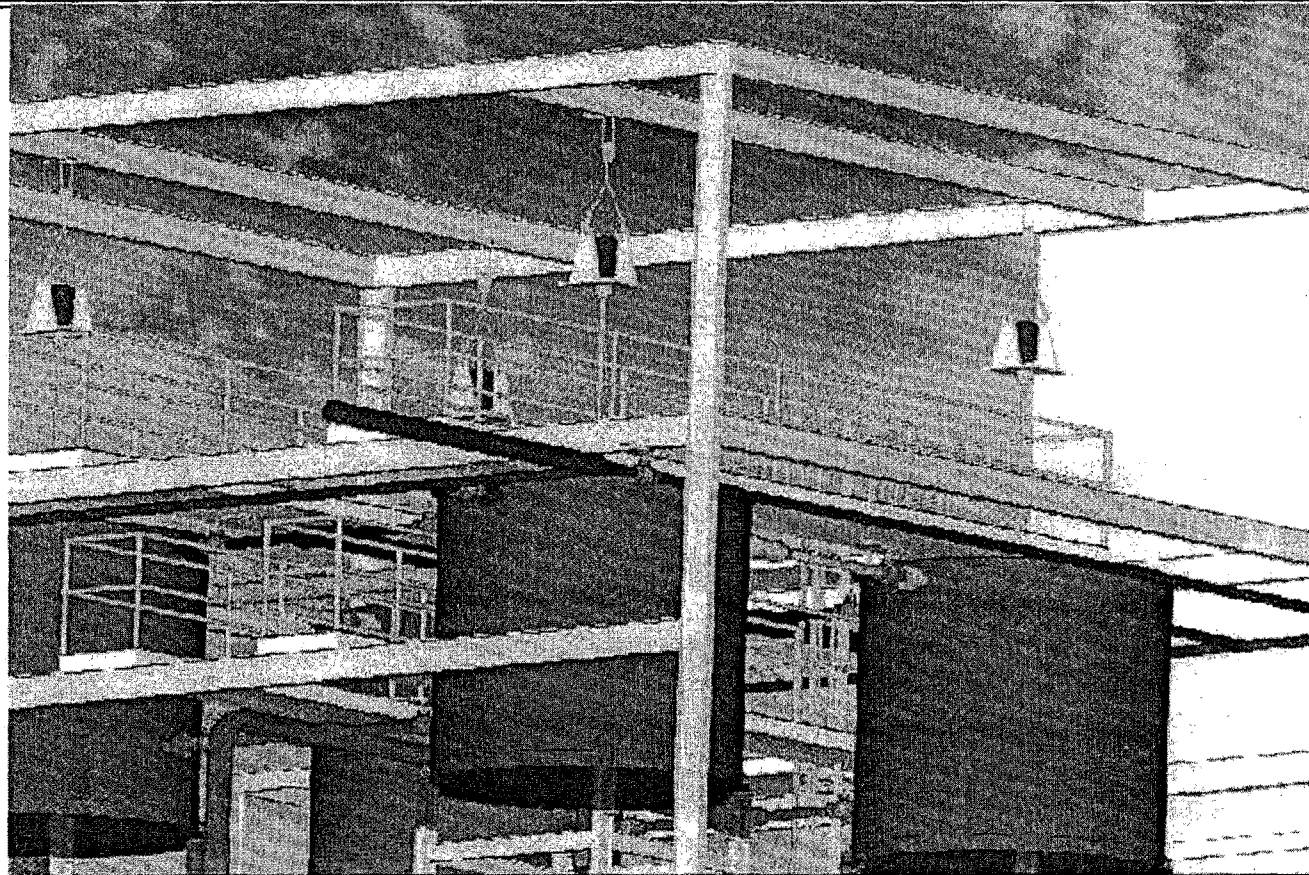


Fig. 4 x Vista frontal de la planta de tratamiento propuesta



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las concentraciones de aluminio y cromo del residuo justifican el desarrollo de un proceso para su recuperación.

La liberación del cromato requiere de disolver a la alúmina lo que indica que está retenido por esa sustancia amorfa. Parte de los cromatos están ocluidos y otra parte adsorbidos, aunque la fuerza de retención es baja. La mayor parte se libera fácilmente con agua, y solamente una baja concentración ($\cong 1.6\%$) permanece en el material.

La solución de carbonatos libera más cromatos que los OH^- . (al pH similar)

La mayor parte de los cromatos se liberan con agua, mientras que la otra parte se retiene en el sólido. Durante la extracción de los cromatos retenidos, se encontró que parte están ocluidos y otra porción está sorbida..

Las condiciones de liberación de cromatos más eficientes son: 1 hora de agitación a 250 rpm -que es la máxima velocidad que se alcanza con el equipo que ya existe en la planta-; relación 1 : 5 (residuo : extractante) y 1½ hora de sedimentación. La extracción se realiza sucesivamente en dos lavados, la primera con agua y la segunda con solución de carbonatos (0.1M).

El diseño del proceso presenta las siguientes ventajas

- Bajo consumo de agua y reactivos
- Baja inversión de capital ya que utiliza equipo existente y no requiere equipos especiales
- No se aumenta el volumen de sólidos
- El residuo tratado ya no se clasifica como peligroso
- No se generan emisiones al ambiente.
- El sólido residual presenta un alto contenido de aluminio

- Los tanques de agitación en los cuales se realiza una sedimentación parcial, evita el uso de filtros
- La elevación de los tanques evita el uso de bombas
- El diseño de cada etapa del proceso reduce los tiempos de operación, pero establece lapsos, entre el tratamiento de un lote y otro, para el mantenimiento del equipo

Se considera importante que en el futuro se lleven a cabo estudios complementarios para recuperar el aluminio del residuo lixiviado, así como para reducir más el consumo de agua.

Dentro de estos estudios se podría evaluar si se puede lixiviar los carbonatos de sodio que todavía contiene el residuo mineral y medir su eficiencia para recuperar cromatos del residuo rico en alúmina.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson RA. (1980) Nutritional role of Cr. *Sci Total Environ*; 17: 13-29.
- Appelo C.A.J. y D. Postma D. (1993) *Geochemistry, Groundwater and Pollution* . P.154. Ed. A.A. Balkema rotterdam netherlands total de páginas 535
- Aubert, H. y Pinta, M. (1980) Trace Elements in Soils, Elsevier Scientific, 1st Edition, 2nd Impression. Amsterdam, pp 395
- Babor J.A. y Ibarz A.J. (1964) *Química General Moderna*, Ed. Morín, S.A., p. 687
- Barceloux Donald G. (1999).Chromium; *Clinical Toxicology*, pp. 37.
- Capellmann M, Bolt HM.(1992) Chromium (VI) reducing capacity of ascorbic acid and of human plasma in vitro. *Arch Toxicol*; 66: 45-50.
- Cary E., Alloway W., Olson O., (1977); *Control of chromium concentrations in foods plants, Absorption and translocation of Chromium by plants*; Journal Agric. Food Chem. Vol. 25, num. 2,
- Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas*, Secretaría de Economía, 2003.
- Cervantes C., Campos G., Devars S. Gutiérrez C. F., Loza T. H., Torres G. J. y Moreno S. R.(2001) *Interactions of chromium with microorganisms and plants*. FEMS Microbiology Reviews Vol.25 , p.35-347.
- Cotton A. y Wilkinson G. (1973); *Química inorgánica avanzada*, Ed. Limusa-Wiley SA, México pp. 784
- De flora S., Camoirano A., Serra D. y Bennicelli C., (1989); *Genotoxicity and Metabolism of Chromium Compounds*; Toxicological and environmental chemistry, Vol. 19, pp. 153-160.

- Dion D.H. y Vincent J. (2002); *In vivo distribution of chromium from chromium picolinate in rats and implications for the safety of the dietary supplement*, Chemical research in toxicology, vol 15 num 2, pp. 93-99
- Dupuis G, Benezra C. (1982) *Allergic Contact Dermatitis to Simple Chemicals: A molecular Approach*. New York: Marcel Dekker, pp. 82-85.
- EPA Método 7198. Chromium, Hexavalent (Differential Pulse Polarography), revision 0, 1986
- EPA, Método 3060- A. Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium, Revisión 1, 1996.
- EPA, Método 7196-A. Chromium, Hexavalent (Colorimetric), revision 1, 1992.
- García G. A, (1998); *Estabilización de un residuo rico en cromo hexavalente*, tesis de licenciatura; Facultad d Química, UNAM .
- García P. A, Martín P. A, Pérez P. B. (1963); *Eczemas de contacto con sensibilidad al cromo en amas de casa*. Actas Dermo-Sifliográficas; 54: 621-625.
- Gil G., Manriquez L., Fernandez J.M. (1995); *Dermatitis de contacto por cemento, toxicocinética del cromo y derivados. Fuentes de exposición*. Actualidad Dermatológica, vol. 34, Mayo 1995. p 365
- González M. A, (2002); *Caracterización y tratamiento de un residuo toxico proveniente de la obtención de cromatos, recuperación de cromo hexavalente*, tesis de licenciatura; Facultad de Química, UNAM.
- Guha, H., J. E. Saiers, S. C. Brooks, P. M. Jardine, and K. Jaychandran. (2001). *Chromium transport, oxidation, and adsorption within b -MnO₂-coated sand*. Journal of Contaminant Hydrology vol.49; pp.311-334.

Gutiérrez , M. E.,(1992) UNAM Instituto de Geografía. *Investigación del Impacto Ambiental de la Dispersión de los Compuestos de Cr en área del valle de León*, Gto. Química Central de México S.A. de C.V. ; UNAM Instituto de Geofísica.

Gutiérrez M. E., Bazúa E. R., González, M.L. y Villalobos, M., (1991), *Estabilización y fabricación de ladrillos*, en Premio Nacional SERFIN. El medio ambiente, Futura editores, SA de CV, Villa Nicolás Romero, Méx. p 19-25

Gutiérrez Ruiz, M. ,Villalobos-Peñalosa, M. y Miranda, J.A. (1990); *Chromium pollution evaluation in groundwaters of North Mexico City*. Rev. Int. Contam. Ambient. 6: 5-18

Hagenfeldt L, Arvidsson A, Larsson A. (1978). *Glutathione and gamma-glutamylcysteine in whole blood, plasma and erythrocytes*. Clin Chim; 85: 167.

Huheey, J. E. (1978) *Inorganic Chemistry*. Second Ed. Harper and Row. New York. Pp 312-325

International Standard, método ISO 11464. *Soil quality- Pretreatment of samples for physico-chemical analyses*. Primera edición 1994-10-01

Jeanine G, Meeussen J., Hillier S., David G. Lumsdon R, G. Farmer J. and Paterson E. (2002). *Identification and geochemical modeling of processes controlling leaching of Cr(VI) and other major elements from chromite ore processing residue*. Geochimica et Cosmochimica Acta. Volume 66, Issue 22 : 3927-3942

Katz, S.A., Salem, H. (1994), *The biological and environmental chemistry of chromium*; VCH: New York.

Keenan C., Kleinfelter D., Wood J. (1985); *Química general universitaria*, México 3ª edición, ed. Continental, pp.944

Kirk y Othmer (1979). *Encyclopedia of Chemical Technology*. 3rd Ed. John Wiley and Sons, New York, Vol. 6, pp. 54-56, 82-120

Kumupulainen JT. (1992) Chromium content of foods and diets. *Biol Trace Elem Res* ; 32: 9-18.

Langård S, Norseth T. (1979) Chromium. En: Friberg L, Nordberg GF, Vouk VB, *Handbook on the Toxicology of Metals* . Amsterdam: Elsevier North-Holland.

Langård SA. (1980) *A survey of respiratory symptoms and lung function in ferrochromium and ferrosilicon workers*. *Int Arch Occup Environ Health*; 46: 1.

Langmuir D. (1997) *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice may. Inc. USA, 600 pp.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, (1993), 8° ed., México, Porrúa, 577pp.

Mertz, W. (1969). *Chromium Occurrence and Function in Biological Systems*. *Physiol. Rev.* vol. 49, pp. 163-239.

Mertz, W. y Scharz, K. (1955). *Impaired intravenous glucose tolerance as an early sign of dietary necrotic liver degeneration*. *Arch. Biochem. Biophys.* Vol.58, pp 504-506.

Moller D.R., Brooks S.M., Bernstein D.I., Cassedy K., Enrione M., Bernstein I.L. (1986); *Delayed anaphylactoid reaction in a worker exposed to chromium*. *J Allerg Clin Immunol* vol.77 pp. 451-456.

Norma ISO 11464, *Pre-tratamiento de muestras para los análisis físicos y químicos*.

Poschenrieder, Ch, Barcelo, J., Gunse, B. (1986). *El Impacto del cromo en el ambiente. 1. Presencia natural y antropogénica del Cromo en el ambiente*. *Circular Farmacéutica* 290: 23-38 . Barcelona.

Rinehart WE, Gad SC. (1986) *Current Concepts in Occupational Health: Metals - Chromium*. *Am Ind Hyg Assoc Journal*; 47: 696-699.

Smith TJ, Blough S. (1983). *Chromium, Manganese, Nickel and Other Elements*. En: Rom W, MPH, ed. *Environmental and Occupational Medicine*. 1.^a ed Boston: Litte, Brown and Company; pág. 491-494.

Soto Melo J. (1966) *Ulceraciones por cromo*. Pigeonneau. *Actas Dermo-Stfiliográficas*; 57: 323.

Srivastava AK, Gupta BN, Mathur N, Rastogi SK, Garg N, Chandra SV. (1992); *Blood chromium and nickel in relation to respiratory symptoms among industrial workers*. *Vet Hum Toxicol*; 34.

Tronnier H, Turck B. (1969); *Licht und Chromekzem. Berufsdermatosen*; 17: 1.

Ullmann F, (1950) *Enciclopedia de Química Industrial*. Industria química inorgánica y sus productos. Tomo III sección II, Editorial Gustavo Gil.

Versiek J, Hoste J, Barbier F, Steyaert H, De Rudder J, Michels H. (1978); *Determination o chromium and cobalt in human serum by neutron activation analysis*. *Clin Chem*; vol.24 pp. 303-308.

Wong D. (1989), *Mechanism and theory in food chemistry*, New York : Van Nostrand Reinhold, p 428

Yawata Y, Tanaka KR. (1973). *Red cell glutathione reductase: mechanism of action of inhibitors*. *Biochim Biophys* ; vol.321 pp.72.

Zielhuis RL. (1981) *Exposure Limits no Metals for the General Population*. Proc Int Conf Heavy Metals in the Environment, CEC-WHO, Amsterdam.

Apéndice A

A.1 Resultados de los análisis cualitativos y cuantitativos del residuo rico en alúmina (González 2002)

COMPUESTO	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	ESPECTROSCOPIA DE IR
Al ₂ O ₃	✓	✓
Na ₂ SO ₄	✓	✓
SiO ₂	✓	✓
Na ₂ CrO ₄	✓	✓
AlSi ₂ O ₅ (OH) ₂	✓	
(Mn,Mg) ₇ (SiO ₄) ₃ (OH) ₂	✓	
FeVO ₄	✓	

Compuestos encontrados en el residuo mediante Difracción de Rayos X y Espectroscopia de IR cercano (González 2002)

ELEMENTO	ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA RAYOS X (%)	ABSORCIÓN ATÓMICA (%)
O	46.11	---
Na	13.34	---
Al	11.62	11.06
Si	7.26	---
S	2.38	---
K	0.76	---
Ca	0.38	---
Cr	11.8	12.26
Fe	0.35	---

Elementos encontrados en el residuo al someter las muestras a estudios de Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X, y Absorción Atómica (González 2002)

Apéndice A.2. Métodos y técnicas experimentales

A.2.1. Preparación de muestras para análisis físicos y químicos (método ISO 11464)

Se homogenizo la muestra por medio de un procesos de cuarteo para preparar una muestra compuesta y representativa.

Se secaron las muestras a una temperatura que no excediera los 100 °C durante 24 horas

Se molió en un molino de bolas y se tamizó hasta obtener partículas de 250 μm (60 mesh).

Una vez molida la muestra se volvió a homogenizar y se tomó un 1 kg para realizar los experimentos y medición de propiedades.

A.2.2. Medición de pH y Conductividad de las muestras analizadas

- Se tomaron 10 g de muestra en recipientes de vidrio, debidamente marcados y por duplicado
- Se agregaron 50 mL de agua destilada y se taparon perfectamente con un tapón plástico
- Se colocaron en un agitador mecánico, durante 1 hora a 250 rpm
- Una vez finalizada la agitación se dejó que se sedimentaran las muestras

Se midieron los valores de pH y conductividad en los extractos obtenidos. Los equipos utilizados fueron calibrados de acuerdo a su manual al inicio y cada 10 muestras.

El equipo utilizado para la medición de pH y conductividad fue:

Agitador orbital marca Lab-Line modelo 4690

pH metro marca Fisher Scientific modelo Accumet 10

Potenciómetro marca Beckman modelo720

A.2.3.Método 3060-A digestión alcalina

Este método utiliza una digestión alcalina para solubilizar el cromo hexavalente presente en la muestra sólida. La muestra se digiere usando una solución 0.28M de Na_2CO_3 / 0.5M de NaOH y calentando de 90 a 95°C durante 60 minutos.

Posteriormente el extracto alcalino es analizado mediante UV-Vis por el método 7196-A colorimetría, a partir de una curva de calibración preparada previamente.

Preparación de las soluciones

- Solución digestiva: disolver 20.0 ± 0.05 g de NaOH y 30.0 ± 0.05 g de Na_2CO_3 en agua y transferir a un matraz volumétrico de 1L. Se llevó la solución a la marca de aforo con agua destilada. El pH de la solución fue de 13.5.
- Buffer: Disolver 87.09 g de K_2HPO_4 y 68.04 g de KH_2PO_4 en agua y transferir a un matraz volumétrico de 1L. Llevar a la marca de aforo con agua destilada.
- MgCl_2 con el fin de evitar la reducción de Cr(VI) a Cr(III)
- Estándar de 100ppm de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

Todos los reactivos utilizados fueron grado analítico.

El equipo utilizado para este procedimiento fue el Horno de microondas marca Cem modelo Mars X

Procedimiento

- Se colocaron 2.5 ± 0.01 g de muestra en los frascos digestores. Posteriormente se adicionaron 50 mL de solución digestiva, 300 mg de cloruro de magnesio y 1 mL de solución amortiguadora
- Se colocaron en agitación y calentamiento por una hora
- Controles de calidad

En cada lote, cada 8 muestras se colocó una muestra adicional a la cual se le adicionó una cantidad conocida de un estándar de 100 ppm de Cr(VI), con la finalidad de conocer la eficiencia de extracción. Además un blanco y un blanco adicionado con un estándar de 100 ppm de Cr(VI).

A.2.4.Método 7196-A Lectura de Cr (VI)

Aparatos y reactivos utilizados

Agua desionizada

Solución estándar de dicromato de potasio

Acido sulfurico al 10 % (v/v)

Solucion de difenilcarbazida. Se disolvió 250 mg de difenilcarbazida en 50 mL de acetona

Acetona grado analítico

Espectrofotometro de UV-visible marca CARY modelo 3E

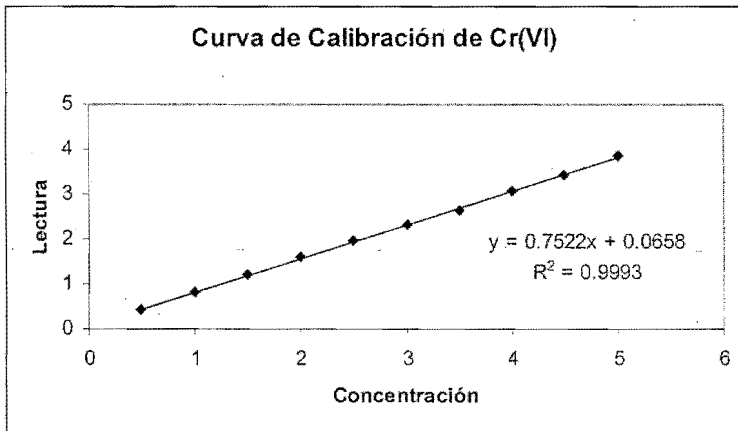
Una vez realizada la digestión se toma una alícuota de volumen conocido del extracto a un matraz volumétrico de 100 mL se le adicionan 2 mL de la solución de difenilcarbazida y se mezcla.

Se añade la solución de ácido sulfúrico de modo que la solución quede a un pH de 2 ± 0.5 y se completa a 100 mL con agua.

Se toma una porción de la solución y se transfiere a una celda de absorción de 1 cm y se mide la absorbancia a 540 nm para saber la concentración de Cr (VI) en el residuo

Para hacer las mediciones correctas de absorbancia se realizó una curva de calibración como referencia dando los siguientes resultados.

Punto	Conc (ppm)	Lectura
1	0.5	0.413
2	1	0.8273
3	1.5	1.2091
4	2	1.5987
5	2.5	1.9629
6	3	2.3337
7	3.5	2.6412
8	4	3.0647
9	4.5	3.4203
10	5	3.8716



Ecuación de la curva de calibración: $y = 0.7522x + 0.0658$

Coefficiente de correlación: 0.9993

Límite de cuantificación: 50 mg / L

Límite de detección: 0.045 mg / L

APENDICE B

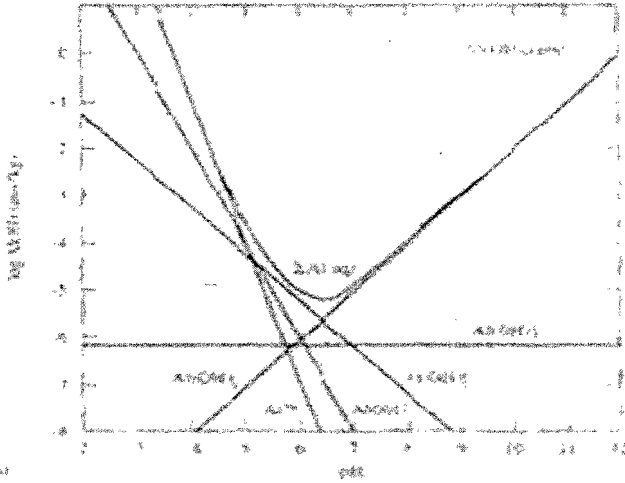


Figura B 2. Solubilidad de la alúmina en función del pH.

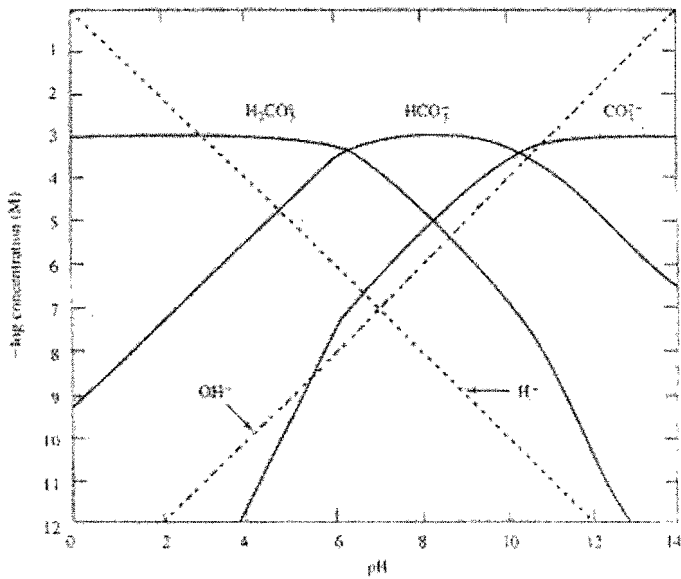


Figura B1 Distribución de especies de carbonatos en función del pH.

ANEXO 1**NORMAS QUE REGULAN LA CALIDAD
EN LA FABRICACION DEL ACERO**

Cada país tiene sus normas, las mas importantes están indicadas a continuación:

SAE	ESTADOS UNIDOS
ASTM	ESTADOS UNIDOS
DIN	ALEMANIA
JIS	JAPON
BS	INGLATERRA
AFNOR	FRANCIA
ITINTEC	PERÚ
COVENIM	VENEZUELA
UNE	ESPAÑA
UNI	ITALIA
GOST	RUSIA

En el caso de los aceros para construcción las normas más comunes son:

ASTM A615 GRADO 60	Barras de construcción
ASTM A706	Barras de construcción soldables
ASTM A36	Perfiles de acero estructurales

La norma SAE suministra un medio uniforme de designación de aceros. Los códigos SAE establecen rangos de composición química que deben de cumplir el acero para poder usar el prefijo SAE.

NORMA SAE

La norma SAE J403e establece la composición química de los aceros al carbono SAE:

SAE 1005
SAE 1095
SAE 1110
SAE 12L14
SAE 1513
1572

La norma SAE J404F establece la composición química de los aceros aleados.

La norma J405b establece la composición química de los aceros aleados forjados.

ESTRUCTURA DE LA CODIFICACION SAE (SAE J402b)

El primer dígito del código indica el tipo al cual pertenece el acero:

- 1 indica un acero al carbono
- 2 indica un acero al níquel
- 3 indica un acero al cromo-níquel

En el caso de un simple acero aleado, el 2° dígito del código generalmente indica un aleante o combinación de aleantes y, algunas veces, el porcentaje aproximado del elemento aleante predominante.

Usualmente los últimos 2 o 3 dígitos indican el contenido aproximado de carbono, en "puntos o centésimos de uno por ciento". Así el "SAE 5135" indica un acero al cromo de aproximadamente 1% de cromo (0,80 a 1,05%) y 0,35% de carbono (0,33% a 0,38%)

Ejemplos:

1. El acero SAE 1020, tiene los siguientes rangos de composición química

C = 0,18 - 0,23 %

Mn = 0,30 - 0,60 %

P = 0,040 % max.

S = 0,050 % max.

Si = 0,035 % max.

El código SAE nos indica SAE 1020

S A E 1 0

Acero al Carbono

2 0

carbono = 0,20%

NORMA ASTM

(AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS)

Los requisitos o características que debe cumplir una cañería (su diámetro nominal es distinto de su diámetro real) o un tubo (su diámetro nominal coincide con su diámetro real) están determinados por su aplicación o uso. Estos requisitos consisten fundamentalmente en reunir ciertas propiedades mecánicas y tener ciertas características de resistencia al medio al que serán expuestas, lo que está determinado, fundamentalmente, por el material, método de fabricación y tratamiento térmico de éste.

Con el fin de ordenar, uniformar y asegurar la calidad, se han establecido normas que, como las ASTM, se preocupan de estos aspectos. Dado que no es económico imponer exigencias de fabricación que produzcan características no necesarias en una aplicación particular, no existe una norma única y se han desarrollado normas específicas para cada tipo de aplicación. De aquí que el número de normas ASTM existentes para cañerías y tubos es muy grande.

ASTM ha organizado las múltiples normas en grupos separados. Todas aquellas que se refieren a metales ferrosos (hierro y aceros), llevan el prefijo A (ejemplo A312). Las que se refieren a metales no-ferrosos, llevan el prefijo B (ejemplo B622). Aquellas que llevan una doble designación como A789/A789M-99, contemplan unidades de medidas tanto imperiales como métricas (los dígitos después del guión se refieren al año de publicación de la norma).

Hay normas que se refieren a requisitos generales que son necesarios en un gran número de normas específicas (Ejemplo A530: Requisitos generales para cañerías especializadas de aceros al carbono y aceros aleados) y hay otras que son específicas para un tipo de aplicación particular (Ejemplo A270: Especificaciones estándar para tubos con y sin costura de acero inoxidable austenítico de uso sanitario).

Al momento de especificar una cañería o tubo para una aplicación particular se debe tener presente que puede haber varios materiales, contemplados dentro de una norma, que cumplen con los requisitos particulares. Por otro lado, un mismo material, puede estar incluido en varias normas.

Hay dos normas generales para cañerías y para tubos, que son aplicables a una serie de normas particulares por lo que forman parte implícita de cada una de ellas:

A530: Especificación estándar de los requisitos generales para cañerías especializadas de aceros al carbono y aceros aleados.

A450: Especificación estándar de los requisitos generales para tubos de aceros al carbono, aceros aleados ferríticos y aceros aleados austeníticos.

Estructura del código ASTM

Esta formado de la siguiente manera:

A S T M	A 3 6 / A 3 6 M	-	9 6	a
Norma	Código (sistema Inglés y Sistema Métrico)		Año de adopción	Revisión en año

Ejemplos:

ASTM A 6 / A 6M -	9 6 b 3° revisión en 1996	Requerimientos generales para planchas, perfiles y láminas de acero estructural laminados.
ASTM A615/A615M -	9 a 2° revisión año 1996	Barras de acero deformado y lisa para refuerzo de concreto armado

Cuando el acero tiene varios grados, se indica el grado del acero a continuación de la norma.

Ejemplos:

ASTM A615/A615M - 96 a Grado 60 ó ASTM A572 /A572M - 94c Grado 50
--

Generalmente en estos casos el grado indica el valor del límite de fluencia en miles de libras por pulgada cuadrada (Kips). Así por ejemplo:

ASTM A615 /A615M 96a Grado 60 indica las barras de construcción con un límite de fluencia mínimo de 60 000 libras por pulgada cuadrada.

El acero ASTM A572/A572M-94c Grado 50 indica que el límite de fluencia mínimo de este acero estructural es de 50 000 libras por pulgadas al cuadrado.

Las normas ASTM de materiales establecen valores mínimos para:

Límite de fluencia Resistencia a la tracción Alargamiento Doblado
--

Ejemplo:

En el acero ASTM A 36 los valores mínimos establecidos por la norma son:

Límite de fluencia: 36 000 lbs/pulg ² Resistencia a la tracción: 58 000 – 80 000 lbs /pulg ² Alargamiento: 20 %

Composición química

Para efectos de garantizar la soldabilidad la norma ASTM establece valores Máximos permisibles para el:

Carbono Manganeso Azufre Fósforo

Así por ejemplo la Norma ASTM A615 Grado 60 establece como limite máximo de fósforo de 0,050 %.

La norma ASTM A 36 establece valores mínimos siguientes:

S =	0,050 % máximo
P =	0,040 % máximo

La Norma ASTM es la mas utilizada internacionalmente.

Aceros Inoxidables Serie 300

Entendemos por acero una aleación de Hierro y Carbono(y pequeñas cantidades inevitables de manganeso, cobre, silicio, azufre y fósforo) que se caracteriza por sus propiedades de resistencia mecánica muy superiores a las del hierro puro.

La adición al acero de algunos elementos tales como Cromo, Molibdeno, Niquel, Vanadio, Aluminio, Cobalto, Columbio (Niobio), Titanio, Tungsteno, Zirconio u otro le confiere propiedades mecánicas especiales para una aplicación determinada.

Estos aceros se denominan genéricamente aceros aleados. También se consideran aceros aleados aquellos en que se excede los siguientes valores límite: 1.65% Manganeso, 0.60% Silicio o 0.60% Cobre.

Los aceros inoxidables de la serie 300, según designación AISI/ASTM, son los aceros en toda industria que maneja ambientes y fluidos corrosivos.

Corresponden a una categoría denominada "Aceros Austeníticos", por tener todos la estructura metalográfica del hierro a temperatura alta ($> 910^{\circ}\text{C}$). Formados básicamente por la incorporación al hierro, elementos de aleación como Cr, Ni, Mo y otros, logran mantener a temperatura ambiente y en forma estable, la estructura de la austenita, gracias al níquel.

La serie 300, es fácil de trabajar en frío y se puede soldar con facilidad, con ciertas precauciones. La propiedad de inoxidable, se la deben fundamentalmente al contenido de cromo (>10.5). El papel del níquel es básicamente estabilizar la estructura austenítica y contribuir a la resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas.

La resistencia a la corrosión y las buenas propiedades mecánicas, dependen no sólo de la composición del acero, sino también de su estructura. Por esta razón, mediante un adecuado tratamiento térmico (recocido a disolución) consistente en calentar a alta temperatura ($>1040^{\circ}\text{C}$) durante un tiempo (para asegurar la "disolución" total del carbono), seguido por un enfriamiento brusco, se logra un acero de óptimas propiedades.

El acero 304 y sus variantes, constituyen un grupo muy popular, cuyos elementos de aleación son cromo (18-20%) y níquel (8-11%). El grado 304 corriente, con los mínimos contenidos aceptables de Cr (18%) y Ni (8%) ha sido tradicionalmente designado como acero inoxidable 18-8. Presenta una buena resistencia a la corrosión atmosférica y por agentes corrosivos moderados, especialmente a temperatura ambiente.

La variante 304L se diferencia por un contenido de carbono (0.035%) inferior al 304 (0.08%), con lo cual se elimina el problema de "sensibilización" (que conduce a problemas de corrosión intergranular) en la zona afectada por el calor durante la soldadura. El grado 304L puede ser soldado y usado tal cual, sin necesidad de tratamiento térmico, ya que la soldadura y zona vecina, no sufrirán de corrosión intergranular. Como consecuencia del menor contenido de carbono del grado 304L, las propiedades mecánicas, "tensión de ruptura" (S) y "límite elástico" (Y) se ven disminuidas.

La forma tradicional de mejorar las propiedades mecánicas de aceros para ser usados a alta temperatura es aumentar el contenido de carbono. El grado 304H puede tener hasta 0.10% de carbono para este efecto. Una forma más moderna de mejorar la resistencia mecánica (especialmente a alta temperatura) es agregando pequeñas cantidades de nitrógeno a la aleación del acero, el que actúa como elemento intersticial, "disuelto", igual que el carbono. El grado 304N y 304LN contienen nitrógeno con ese fin. El nitrógeno también contribuye a mejorar la resistencia a la corrosión por "pitting" (corrosión por picadura) causada por cloruros.